

**УДК 681.513.3:681.5.033**

**А.А. ХУДЯЕВ**, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков  
**Д.Г. ЛИТВИНЕНКО**, аспірант, НТУ "ХПИ", Харьков

## **ИТЕРАЦИОННОЕ ПОДЧИНЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЛЕДЯЩИМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

Подані варіанти структурних схем та результати порівняльного аналізу якості ітераційних триканальних слідкуючих електроприводів з різним типовим настроюванням каналів керування.

Приводятся варианты структурных схем и результаты сравнительного анализа качества итерационных трехканальных следящих электроприводов с различной типовой настройкой каналов управления.

**Введение.** Высокоточные электромеханические воспроизводящие системы необходимы для управления следящими электроприводами (ЭП) роботов, манипуляторов, механизмов подач станков с ЧПУ, гироскопов, рулевых, орудийных и антенных установок, радиотелескопов, синхронных генераторов и паровых турбин повышенной точности вращения, и других динамичных объектов и механизмов точного управления промышленного и специального назначения.

Для эффективного повышения динамической точности воспроизведения управляющих воздействий различными следящими ЭП, в том числе с типовой настройкой, целесообразно применять многоканальные системы "грубого" и "точного" управления. В настоящее время многоканальные системы "грубого" и "точного" управления ЭП, основанные на итерационном (от лат. *itarativus* – многократный) принципе последовательных приближений, объединяют в общем классе итерационных многоканальных систем автоматического управления (САУ) [1-4].

**Постановка задачи.** Итерационные многоканальные следящие САУ в общем случае состоят из  $N$  автономных каналов управления, в каждый из которых входит соответствующий ЭП с необходимыми элементами. Практически число каналов  $N$  для высокоточных систем большой мощности может достигать до 4 [3,4]. Будем предполагать, что все ЭП имеют подчиненное управление с типовой настройкой или используют типовые корректирующие устройства (КУ) в основном контуре управления и соединяются с общей нагрузкой, например, че-

рез дифференциальные редукторы (механические дифференциалы) – МД, в которых происходит сложение движений приводов отдельных каналов. Такие системы будем называть итерационными многоканальными следящими ЭП с типовой настройкой каналов.

Рассмотрим практически важный случай, когда  $N=3$ , т.е. когда в итерационной следящей системе используются три автономных привода, функционирующие (взаимодействующие между собой) по итерационному [4-6] или близкому к нему алгоритмам. В качестве возможных рассмотрим три типа итерационных трехканальных следящих ЭП с типовой настройкой каналов, структурные схемы которых приведены на рис. 1-3 [7]. На схемах обозначены:  $R_1^*(p)$ ,  $R_2^*(p)$  и  $R_3^*(p)$  – дифференциальные операторы первого (грубого) К-1, второго (компенсирующего) К-2, и третьего (точного) К-3 разомкнутых ЭП по скорости с учетом соответствующих усилительно-регулирующих и исполнительных элементов и устройств;  $K_{РП,1}(p)$ ,  $K_{РП,2}(p)$  и  $K_{РП,3}(p)$  – операторы регуляторов (или КУ) контуров положения соответственно тех же каналов; МД1 и МД2 – первый и второй дифференциальные редукторы;  $p=d/dt$  – оператор дифференцирования по времени  $t$ .

В настоящей статье выполним сравнительный анализ динамических и точностных показателей качества функционирования таких итерационных трехканальных следящих ЭП с различной настройкой каналов управления без учета потерь в дифференциалах и нагрузки на выходном валу МД2. При этом предполагается, что отдельные внутренние контуры управления в каналах могут быть как замкнутыми, так и разомкнутыми.

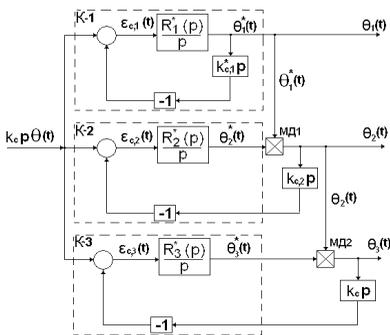


Рис. 1.

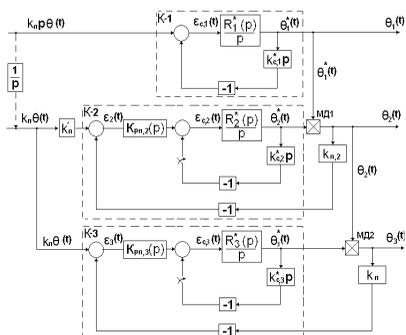


Рис. 2.

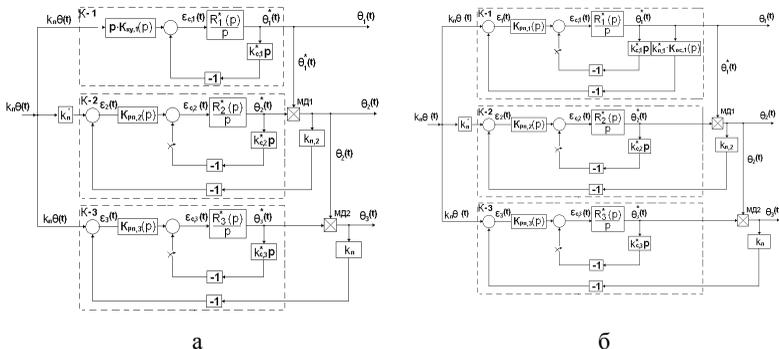


Рис. 3.

**Материалы исследования.** Следящей системой по скорости принято называть замкнутую систему, скорость, на выходе которой пропорциональна входному напряжению. В связи с этим систему, структура которой изображена на рис.1, условно будем называть трехканальной следящей системой типа "*скорость-скорость*". Фактически такая система соответствует возможной разомкнутой системе управления по углу  $\Theta(t)$  с итерационным трехканальным следящим контуром скорости, т.е. представляет собой итерационный трехканальный

следящий ЭП по скорости входного сигнала  $p \Theta(t) \equiv \dot{\Theta}(t) = \omega(t)$ . При этом контуры управления токами приводов каналов могут быть как замкнутыми (с подчиненной настройкой), так и разомкнутыми.

Систему, структурная схема которой изображена на рис. 2, назовем трехканальной следящей системой типа "*скорость-угол*". По сути, такая трехканальная система представляет собой комбинированный итерационный трехканальный следящий ЭП по углу  $\Theta(t)$ . Такой ЭП включает в качестве разомкнутого контура управления следящий ЭП по скорости первого, грубого канала К-1, а в качестве замкнутого контура – итерационный двухканальный следящий ЭП по углу на базе компенсирующего К-2 и точного К-3 каналов с внутренними замкнутыми (с подчиненной настройкой) или разомкнутыми контурами скорости.

Систему, структуры которой изображены на рис. 3, будем называть трехканальной следящей системой типа "*угол-угол*". Она может быть выполнена, как минимум, в двух вариантах, обозначенных на рис. 3 через *а* и *б*. Отличие одного варианта от другого нетрудно уяснить из рассмотрения их структурных схем. Фактически трехканальная система на

рис. 3,а соответствует системе на рис. 2, но дополнительно имеет возможность последовательной коррекции разомкнутого контура положения грубого канала К-1. Поскольку в настоящей статье предполагается, что оператор дополнительного КУ  $K_{КУ,1}(p) = 1$ , динамику данного варианта системы типа "угол-угол" анализировать не будем.

Система на рис. 3,б – это классический вариант итерационного трехканального следящего ЭП по углу  $\Theta(t)$  с внутренними подчиненными контурами управления скоростью приводов отдельных каналов. Как сравнительные варианты настройки, контуры скорости и (или) тока всех трех каналов управления могут быть разомкнутыми. В данной структуре также предусмотрена возможность дополнительной коррекции контура положения основного канала К-1, но уже с помощью КУ с оператором  $K_{ОС,1}(p)$  в обратной связи (ОС) канала. Для упрощения анализа такой трехканальной САУ примем здесь, что  $K_{ОС,1}(p) = 1$ .

Системы типа "скорость-угол" и "угол-угол" представляют собой позиционные следящие системы, т.е. такие системы, которые наиболее широко распространены в качестве следящих ЭП промышленного и специального назначения.

Для сравнительного анализа итерационных трехканальных следящих ЭП с типовой настройкой в качестве базовых приводов автономных каналов К-1, К-2, К-3 могут быть приняты глубокорегулируемые следящие ЭП постоянного тока с заданными соответствующими коэффициентами усиления  $k_i^*$  ( $i=1,2,3$ ) используемые, например, в механизмах подач металлорежущих станков. Такие ЭП, в том числе с подчиненным управлением, могут быть построены на базе двигателей постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) серий П, ПС, ПГ, ДК, ПБВ или ПБСТ и других мощностью от 0,2 кВт до 20 кВт. Соединение отдельных приводов с общей нагрузкой может осуществляться через два планетарных дифференциальных редуктора: МД1 и МД2. Измерение углов и скоростей вращения в простейшем случае может быть выполнено, например, с помощью сельсинов и тахогенераторов постоянного тока.

При математическом и компьютерном моделировании трехканальных ЭП в качестве исполнительных двигателей (ИД) грубого К-1, компенсирующего К-2 и точного К-3 приводов приняты малоинерционные серийные ДПТ НВ соответственно типов ПГ-9, ПГ-4 и ПГ-2 с номинальной мощностью 9 кВт, 4 кВт и 2 кВт и широтно-импульсным управлением.

Будем предполагать, что при настройках автономных следящих

ЭП по скорости допускается перерегулирование в пределах  $\sigma_i \% \leq 51\%$  ( $i=1,2,3$ ). Тогда для трехканальной системы типа "скорость-скорость" (рис. 1) получим следующие операторы разомкнутых автономных каналов управления ЭП с различной синтезированной типовой настройкой при единичных главных отрицательных ОС.

1. Оператор  $i$ -го разомкнутого канала по скорости с активным последовательным дифференцирующим КУ (ДКУ) и разомкнутым контуром тока:

$$R_i^*(p) = \frac{k_{вж,i}^* (\tau_{к,i} p + 1)}{(T_{к,i} p + 1)(T_{ум,i} p + 1)(T_{1,i} p + 1)(T_{2,i} p + 1)}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $k_{вж,i}^* = k_{\epsilon_c,i} k_{ун,i} k_{ум,i} k_{д,i} k_{с,i}^*$  – заданный (желаемый) коэффициент усиления по скорости, включающий коэффициенты усиления измерителя рассогласования скорости  $k_{\epsilon_c,i}$ , активного ДКУ (требуемое значение)  $k_{ун,i}$ , усилителя мощности (преобразователя энергии)  $k_{ум,i}$ , двигателя  $k_{д,i} = (K_{д,i} \Phi_{ном,i})^{-1}$  и обратной связи по скорости  $k_{с,i}^*$  (при наличии ОС);  $\tau_{к,i}$  и  $T_{к,i} = \rho_i \tau_{к,i}$  ( $0 < \rho_i < 1$ ) – постоянные времени ДКУ;  $T_{ум,i}$  – эквивалентная постоянная времени преобразователя энергии с системой широтно-импульсного управления;  $T_{1,i}$  и  $T_{2,i}$  – эквивалентные постоянные времени ИД:

$$T_{1(2),i} = 0,5 \left( T_{м,i} \pm \sqrt{T_{м,i}^2 - 4T_{м,i}T_{э,i}} \right), \quad T_{2,i} < T_{1,i}.$$

Здесь:  $T_{м,i}$  и  $T_{э,i}$  ( $i=1,2,3$ ) – приведенные электромеханическая и электромагнитная постоянные времени ИД  $i$ -го канала;  $\rho_i$  – коэффициент ослабления пассивной дифференцирующей RC-цепи  $i$ -го канала, для которого обычно выполняется:  $0,025 \leq \rho_i \leq 0,25$  ( $i=1,2,3$ ).

На основании паспортных данных ИД и в результате настройки динамики каналов на допустимое перерегулирование по скорости в формуле (1) принято:

$$\begin{aligned} k_{вж,1}^* &= 40,36, k_{вж,2}^* = 35,15, k_{вж,3}^* = 35,0; \\ T_{м,1} &= 28,8939 \cdot 10^{-3} \text{ с}, & T_{м,2} &= 22,1249 \cdot 10^{-3} \text{ с}, & T_{м,3} &= 12,8798 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \\ T_{э,1} &= 2,3579 \cdot 10^{-3} \text{ с}, & T_{э,2} &= 2,1468 \cdot 10^{-3} \text{ с}, & T_{э,3} &= 2,0034 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \\ T_{ум,1} &= 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}, & T_{ум,2} &= 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}, & T_{ум,3} &= 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tau_{к,1} &= 2,2502 \cdot 10^{-3} \text{ с}, & T_{к,1} &= 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ с}, & \rho_1 &= 5,5551 \cdot 10^{-2}; \\ \tau_{к,2} &= 2,0479 \cdot 10^{-3} \text{ с}, & T_{к,2} &= 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}, & \rho_2 &= 4,4883 \cdot 10^{-2}; \\ \tau_{к,3} &= 1,536 \cdot 10^{-3} \text{ с}, & T_{к,3} &= 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}, & \rho_3 &= 4,883 \cdot 10^{-2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Отметим, что при учете нагрузки операторы разомкнутых каналов по моментам нагрузки  $M_{c,i}(t)$  ( $i = 1, 2, 3$ ), приведенным к валам соответствующих приводов, в данном случае могут быть представлены в виде

$$R_{M_{c,i}}(p) = \frac{k_{M_{c,i}}(T_{э,i}p + 1)}{T_{м,i}T_{э,i}p^2 + T_{м,i}p + 1}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где  $k_{M_{c,i}}$  – коэффициент передачи  $i$ -го канала по моменту нагрузки  $M_{c,i}(t)$ :

$$k_{M_{c,i}} = R_{э,i}k_{д,i}^2 = T_{м,i}(J'_i)^{-1} = R_{э,i}c_{м,i}^2.$$

Здесь:  $R_{э,i}$  и  $J'_i$  – эквивалентное активное сопротивление якорной цепи и приведенный момент инерции ИД  $i$ -го канала;  $c_{м,i} = k_{д,i}^{-1} = K_{д,i}\Phi_{ном,i}$  – коэффициент передачи по моменту ИД  $i$ -го канала.

2. Оператор  $i$ -го разомкнутого канала по скорости с активным последовательным интегрирующим КУ (ИКУ) и разомкнутым контуром тока:

$$\begin{aligned} R_i^*(p) &= K_{ику,i}(p)k_{э_c,i}k_{c,i}^* \frac{k_{ум,i}}{T_{ум,i}p + 1} \frac{k_{д,i}}{(T_{1,i}p + 1)(T_{2,i}p + 1)} = \\ &= \frac{\tilde{k}_{вж,i}^*(T_{к2,i}p + 1)}{(T_{к1,i}p + 1)^2(T_{ум,i}p + 1)(T_{2,i}p + 1)} \quad i = 1, 2, 3, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\tilde{k}_{вж,i}^*$  – заданный (желаемый) коэффициент усиления по скорости, включающий требуемый коэффициент усиления ИКУ  $\tilde{k}_{ун,i}$ :

$$\tilde{k}_{вж,i}^* = k_{вж,i}^* k_{ун,i}^{-1} \tilde{k}_{ун,i} = k_{э_c,i} \tilde{k}_{ун,i} k_{ум,i} k_{д,i} k_{c,i}^*;$$

$K_{ику,i}(p)$  – оператор активного ИКУ:

$$K_{\text{ИКУ},i}(p) = \tilde{k}_{\text{УН},i} \frac{(T_{\text{К}2,i}p + 1)^2}{(T_{\text{К}1,i}p + 1)^2} \quad (T_{\text{К}2,i} < T_{\text{К}1,i}); \quad (5)$$

$T_{\text{К}1,i}$  и  $T_{\text{К}2,i}$  – постоянные времена ИКУ, для которых принято:

$$T_{\text{К}2,i} = \tilde{\rho}_i T_{\text{К}1,i} = T_{1,i}.$$

В (4) и (5) задано:

$$\begin{aligned} \tilde{k}_{\text{ВЖ},1}^* &= 79,41, \tilde{k}_{\text{ВЖ},2}^* = 61,991, \tilde{k}_{\text{ВЖ},3}^* = 51,25; \\ T_{\text{К}1,1} &= 13,1579 \cdot 10^{-2} \text{ с}, T_{\text{К}2,1} = 2,6304 \cdot 10^{-2} \text{ с}, \tilde{\rho}_1 = 0,1999; \\ T_{\text{К}1,2} &= 9,5602 \cdot 10^{-2} \text{ с}, T_{\text{К}2,2} = 1,9125 \cdot 10^{-2} \text{ с}, \tilde{\rho}_2 = 0,2; \\ T_{\text{К}1,3} &= 5,2029 \cdot 10^{-2} \text{ с}, T_{\text{К}2,3} = 1,0398 \cdot 10^{-2} \text{ с}, \tilde{\rho}_3 = 0,1998. \end{aligned} \quad (6)$$

3. Оператор  $i$ -го разомкнутого канала по скорости с активным последовательным ДКУ и подчиненным контуром тока, настроенным на технический оптимум (ТО):

$$R_i^*(p) = \frac{k_{\text{аж},i}^* (\tau'_{\text{К},i} p + 1)^2}{p (T'_{\text{К},i} p + 1)^2 (T_{0,i}^2 p^2 + 2\xi T_{0,i} p + 1)} \quad (T'_{\text{К},i} = \rho'_i \tau'_{\text{К},i}), \quad i = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где  $k_{\text{аж},i}^*$  – заданный (желаемый) коэффициент усиления по ускорению, включающий требуемый коэффициент усиления активного ДКУ  $k'_{\text{УН},i}$ :

$$k_{\text{аж},i}^* = k'_{\text{УН},i} \frac{k_{\text{е}} k_{\text{Д},i} k_{\text{с},i}^* R_{\text{э},i}}{k_{\text{Т},i} T_{\text{М},i}} = k'_{\text{УН},i} \frac{k_{\text{е}} k_{\text{с},i}^* c_{\text{М},i}}{k_{\text{Т},i} J'_i}; \quad (8)$$

$T_{0,i} = \sqrt{2} T_{\mu,i}$  ( $\tau'_{\text{К},i} \leq T_{0,i}$ ) и  $\xi = \sqrt{2}/2$  – эквивалентная постоянная времени и коэффициент демпфирования замкнутого контура тока. Здесь:  $T_{\mu,i} = T_{\text{УМ},i}$  и  $k_{\text{Т},i}$  – некомпенсируемая малая постоянная времени контура тока и коэффициент ОС по току  $i$ -го канала.

При моделировании в (7), (8) принято:

$$k_{\text{аж},1}^* = 3,1623 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}, k_{\text{аж},2}^* = 3,7584 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}, k_{\text{аж},3}^* = 4,9545 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}; \\ T_{0,1} = 3,5355 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad T_{0,2} = 2,8284 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad T_{0,3} = 2,1213 \cdot 10^{-4} \text{ с}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \tau'_{\text{К},1} &= 2,6503 \cdot 10^{-4} \text{ с}, T'_{\text{К},1} = 1,48933 \cdot 10^{-5} \text{ с}, \rho'_1 = 5,6194 \cdot 10^{-2}; \\ \tau'_{\text{К},2} &= 2,1203 \cdot 10^{-4} \text{ с}, T'_{\text{К},2} = 1,1915 \cdot 10^{-5} \text{ с}, \rho'_2 = 5,6194 \cdot 10^{-2}; \\ \tau'_{\text{К},3} &= 1,5902 \cdot 10^{-4} \text{ с}, T'_{\text{К},3} = 8,936 \cdot 10^{-6} \text{ с}, \rho'_3 = 5,6194 \cdot 10^{-2}. \end{aligned} \quad (10)$$

4. Оператор  $i$ -го разомкнутого канала по скорости с П-регулятором скорости и подчиненным контуром тока, настроенным на ТО:

$$R_i^*(p) = k_{pc,i} \frac{k_{\varepsilon_c} k_{c,i}^* R_{\varepsilon,i}}{k_{T,i} T_{M,i} c_{M,i} p (T'_{\mu,i} p + 1)} = \frac{1}{2T'_{\mu,i} p (T'_{\mu,i} p + 1)} = \frac{\tilde{k}_{аж,i}^*}{p (T'_{\mu,i} p + 1)}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (11)$$

где  $\tilde{k}_{аж,i}^* = 0,5(T'_{\mu,i})^{-1}$  – заданный (желаемый) коэффициент усиления по ускорению;  $T'_{\mu,i} = 2T_{\mu,i}$  – некомпенсируемая малая постоянная времени контура скорости;  $k_{pc,i}$  – требуемый коэффициент усиления П-регулятора скорости:

$$k_{pc,i} = \frac{\tilde{k}_{аж,i}^* k_{T,i} c_{M,i} T_{M,i}}{k_{\varepsilon_c} k_{c,i}^* R_{\varepsilon,i}} = \frac{k_{T,i} J'_i}{2k_{\varepsilon_c} k_{c,i}^* c_{M,i} T'_{\mu,i}}. \quad (12)$$

В (11) и (12) задано:

$$\tilde{k}_{аж,1}^* = 1,0 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}, \quad \tilde{k}_{аж,2}^* = 1,25 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}, \quad \tilde{k}_{аж,3}^* = 1,6667 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}; \\ T'_{\mu,1} = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad T'_{\mu,2} = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad T'_{\mu,3} = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}. \quad (13)$$

Нетрудно заметить, что в данном случае контур скорости  $i$ -го канала также настроен на ТО.

5. Оператор  $i$ -го разомкнутого канала по скорости с ПИ-регулятором скорости и подчиненным контуром тока, настроенным на ТО:

$$R_i^*(p) = K'_{PC,i}(p) \frac{k_{\varepsilon_c}}{k_{T,i} (T'_{\mu,i} p + 1)} \frac{k_{c,i}^* R_{\varepsilon,i}}{T_{M,i} c_{M,i} p} = \frac{4T'_{\mu,i} p + 1}{8(T'_{\mu,i})^2 p^2 (T'_{\mu,i} p + 1)} = \frac{k_{qж,i}^* (4T'_{\mu,i} p + 1)}{p^2 (T'_{\mu,i} p + 1)}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (14)$$

где  $k_{qж,i}^* = 0,125(T'_{\mu,i})^{-2}$  – заданный (желаемый) коэффициент усиления по рывку;  $K'_{PC,i}(p)$  – оператор ПИ-регулятора скорости с требуемым коэффициентом усиления интегральной составляющей  $k'_{pc,i} = 0,25k_{pc,i}(T'_{\mu,i})^{-1}$ :

$$\begin{aligned}
 K'_{PC,i}(p) &= k'_{pc,i} \frac{4T'_{\mu,i} p + 1}{p} = k_{pc,i} \frac{4T'_{\mu,i} p + 1}{4T'_{\mu,i} p} = \\
 &= \frac{k_{T,i} c_{M,i} T_{M,i} (4T'_{\mu,i} p + 1)}{8k_{\varepsilon_c} k_{c,i}^* R_{\varepsilon,i} (T'_{\mu,i})^2 p} = \frac{k_{T,i} J'_i (4T'_{\mu,i} p + 1)}{8k_{\varepsilon_c} k_{c,i}^* c_{M,i} (T'_{\mu,i})^2 p}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

В (14) с учетом (13) имеем:

$$k_{qж,1}^* = 5,0 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}, \quad k_{qж,2}^* = 7,813 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}, \quad k_{qж,3}^* = 13,889 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}. \quad (16)$$

Отметим, что в случае (14), (15) контур скорости  $i$ -го канала настроен на так называемый симметричный оптимум (СО).

При настройках автономных позиционных следящих ЭП в системах типа "скорость-угол" (рис. 2) и "угол-угол" (рис. 3) будем полагать, что управление положением на выходе соответствующего трехканального следящего ЭП должно осуществляться практически без перерегулирования ( $\sigma_{п,3}\% = 0$ ). В этом случае апериодическую настройку динамики отдельных автономных приводов (в первую очередь грубого К-1 и компенсирующего К-2) полностью подчиним реализации поставленного условия (по величине перерегулирования в системе) без применения дополнительных корректирующих или ограничивающих устройств в каналах управления.

Вместе с тем, при имитационном (компьютерном) моделировании итерационных трехканальных позиционных систем для удобства принято:  $\sigma_{п,3}\% \leq 1\%$ , что не оказывает принципиального влияния на достоверность результатов исследований и практических выводов по работе. Тогда для трехканальных следящих ЭП типа "скорость-угол" и "угол-угол" в соответствии с рис. 2 и 3 и введенными обозначениями получим следующие синтезированные операторы разомкнутых позиционных каналов (при единичных главных ОС).

6. Для оператора  $i$ -го разомкнутого канала по положению с активным последовательным ДКУ и разомкнутыми контурами скорости и тока вместо (1) имеем:

$$\begin{aligned}
 R_{п,i}^*(p) &= \frac{\hat{k}_{vж,i}^* (\hat{t}_{к,i} p + 1)}{p (\hat{T}_{к,i} p + 1) (T_{ум,i} p + 1) (T_{1,i} p + 1) (T_{2,i} p + 1)} \\
 & \quad (\hat{T}_{к,i} p = \hat{\rho}_i \hat{t}_{к,i}), \quad i = 1, 2, 3, \quad (17)
 \end{aligned}$$

где  $\hat{k}_{vж,i}^* = k_{\varepsilon,i} \hat{k}_{ун,i} k_{ум,i} k_{д,i} k_{п,i}^*$  – заданный (желаемый) коэффициент усиления по скорости, включающий, помимо определенных ранее,

коэффициенты усиления измерителя рассогласования положения  $k_{\varepsilon,i}$ , активного ДКУ (требуемое значение)  $\hat{k}_{\text{ун},i}$  и ОС по положению  $k_{\text{п},i}^*$  (при наличии ОС).

При моделировании в (17) задано:

$$\begin{aligned} \hat{k}_{\text{вж},1}^* &= 0,3514 \text{ с}^{-1}, \hat{k}_{\text{вж},2}^* = 0,7108 \text{ с}^{-1}, \hat{k}_{\text{вж},3}^* = 100,4 \text{ с}^{-1}, \\ \hat{\tau}_{\text{к},1} &= 2,6304 \cdot 10^{-2} \text{ с}, \hat{T}_{\text{к},1} = 2,6304 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \hat{\rho}_1 = 1,0 \cdot 10^{-2}; \\ \hat{\tau}_{\text{к},2} &= 1,9716 \cdot 10^{-2} \text{ с}, \hat{T}_{\text{к},2} = 1,9716 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \hat{\rho}_2 = 1,0 \cdot 10^{-2}; \\ \hat{\tau}_{\text{к},3} &= 1,0398 \cdot 10^{-2} \text{ с}, \hat{T}_{\text{к},3} = 1,0398 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \hat{\rho}_3 = 1,0 \cdot 10^{-2}. \end{aligned} \quad (18)$$

7. Для оператора  $i$ -го разомкнутого канала по положению с активным последовательным ДКУ, разомкнутым контуром скорости и контуром тока, настроенным на ТО, вместо (7) и (8) имеем:

$$\begin{aligned} R_{\text{п},i}^*(p) &= \frac{\hat{k}_{\text{аж},i}^* (\hat{\tau}_{\text{к},i} p + 1)^3}{p^2 (\hat{T}_{\text{к},i} p + 1)^3 (T_{0,i}^2 p^2 + \sqrt{2} T_{0,i} p + 1)} \\ &\left( \hat{T}_{\text{к},i} = \hat{\rho}_i \hat{\tau}_{\text{к},i} \right), \quad i = 1, 2, 3, \end{aligned} \quad (19)$$

где  $\hat{k}_{\text{аж},i}^*$  – заданный (желаемый) коэффициент усиления по ускорению, включающий требуемый коэффициент усиления активного ДКУ  $\hat{k}_{\text{ун},i}$ :

$$\hat{k}_{\text{аж},i}^* = \hat{k}_{\text{ун},i} \frac{k_{\varepsilon,i} k_{\text{д},i} k_{\text{п},i}^* R_{\varepsilon,i}}{k_{\text{т},i} T_{\text{м},i}} = \hat{k}_{\text{ун},i} \frac{k_{\varepsilon,i} k_{\text{п},i}^* C_{\text{м},i}}{k_{\text{т},i} J'_i}. \quad (20)$$

Остальные параметры определены ранее.

При моделировании в (19) и (20) необходимо принять:

$$\hat{k}_{\text{аж},1}^* \approx 8,32 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-2}, \hat{k}_{\text{аж},2}^* \approx 12,6 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-2}, \hat{k}_{\text{аж},3}^* \approx 15,55 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-2}; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_{\text{к},1} &= 3,2901 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \hat{T}_{\text{к},1} = 3,2901 \cdot 10^{-10} \text{ с}, \hat{\rho}_1 = 1,0 \cdot 10^{-6}; \\ \hat{\tau}_{\text{к},2} &= 2,6321 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \hat{T}_{\text{к},2} = 2,6321 \cdot 10^{-12} \text{ с}, \hat{\rho}_2 = 1,0 \cdot 10^{-8}; \\ \hat{\tau}_{\text{к},3} &= 1,9741 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \hat{T}_{\text{к},3} = 1,9741 \cdot 10^{-14} \text{ с}, \hat{\rho}_3 = 1,0 \cdot 10^{-10}. \end{aligned} \quad (22)$$

Из (21), (22) нетрудно видеть, что практическая реализация авто-

номных ЭП с принятыми здесь требуемыми имитационными настройками каналов управления не представляется возможной!

8. Для оператора  $i$ -го разомкнутого канала по положению с активным последовательным ДКУ и подчиненным контуром скорости, настроенным на ТО, аналогично (7) и (8) получим:

$$R_{\Pi,i}^*(p) = \frac{\hat{k}_{vж,i}^* (\tau_{к,i}'' p + 1)^2}{p (T_{к,i}'' p + 1)^2 \left[ (T'_{0,i})^2 p^2 + \sqrt{2} T'_{0,i} p + 1 \right]} \quad (T_{к,i}'' = \rho_i'' \tau_{к,i}''), \quad i = 1, 2, 3, \quad (23)$$

где  $\hat{k}_{vж,i}^*$  – заданный (желаемый) коэффициент усиления по скорости, включающий требуемый коэффициент усиления активного ДКУ  $\hat{k}_{yн,i}$ :

$$\hat{k}_{vж,i}^* = \hat{k}_{yн,i} \frac{k_{э,i} k_{\Pi,i}^*}{k_{с,i}^*}; \quad (24)$$

$T'_{0,i} = \sqrt{2} T'_{\mu,i} = 2\sqrt{2} T_{\mu,i}$  ( $\tau_{к,i}'' \leq T'_{0,i}$ ) – эквивалентная постоянная времени замкнутого контура скорости. Остальные параметры определены ранее.

В (23) и (24) задано:

$$\begin{aligned} \hat{k}_{vж,1}^* &= 20 \text{ c}^{-1}, \hat{k}_{vж,2}^* = 25 \text{ c}^{-1}, \hat{k}_{vж,3}^* = 4200 \text{ c}^{-1}; \\ T'_{0,1} &= 7,0711 \cdot 10^{-4} \text{ c}, \quad T'_{0,2} = 5,6569 \cdot 10^{-4} \text{ c}, \quad T'_{0,3} = 4,2426 \cdot 10^{-4} \text{ c}; \quad (25) \\ \tau_{к,1}'' &= 6,8214 \cdot 10^{-4} \text{ c}, \quad T_{к,1}'' = 6,8214 \cdot 10^{-6} \text{ c}, \quad \rho_1'' = 1,0 \cdot 10^{-2}; \\ \tau_{к,2}'' &= 5,4571 \cdot 10^{-4} \text{ c}, \quad T_{к,2}'' = 5,4571 \cdot 10^{-6} \text{ c}, \quad \rho_2'' = 1,0 \cdot 10^{-2}; \\ \tau_{к,3}'' &= 4,0928 \cdot 10^{-4} \text{ c}, \\ T_{к,3}'' &= 4,0928 \cdot 10^{-6} \text{ c}, \quad \rho_3'' = 1,0 \cdot 10^{-2}. \quad (26) \end{aligned}$$

9. Для оператора  $i$ -го разомкнутого канала по положению с П-регулятором положения и подчиненным контуром скорости, настроенным на ТО, аналогично (11) и (12) имеем:

$$R_{\Pi,i}^*(p) = \frac{k_{э,i} k_{P\Pi,i}}{(T'_{0,i})^2 p^2 + \sqrt{2} T'_{0,i} p + 1} \cdot \frac{k_{\Pi,i}^*}{k_{с,i}^* p} = \frac{\hat{k}_{vж,i}^*}{p \left[ (T'_{0,i})^2 p^2 + \sqrt{2} T'_{0,i} p + 1 \right]}, \quad (27)$$

где  $\widehat{k}_{vж,i}^*$  – заданный (желаемый) коэффициент усиления по скорости;  
 $k_{PI,i}$  – требуемый коэффициент усиления П-регулятора положения:

$$k_{PI,i} = \frac{\widehat{k}_{vж,i}^* k_{c,i}^*}{k_{\varepsilon,i} k_{\Pi,i}^*}. \quad (28)$$

Здесь, как и в формулах (20) и (24), коэффициент  $k_{\Pi,i}^*$  учитывается только при наличии в  $i$ -м канале управления ОС по положению.

В (27) и (28) принято:

$$\widehat{k}_{vж,1}^* = 1,5 \text{ с}^{-1}, \quad \widehat{k}_{vж,2}^* = 2,0 \text{ с}^{-1}, \quad \widehat{k}_{vж,3}^* = 650 \text{ с}^{-1}. \quad (29)$$

10. Для оператора  $i$ -го разомкнутого канала по положению с П-регулятором положения и подчиненным контуром скорости, настроенным на СО, вместо (27) и (28) имеем:

$$\begin{aligned} R_{\Pi,i}^*(p) &= \frac{k_{\varepsilon,i} k'_{PI,i} (4T'_{\mu,i} p + 1)}{8(T'_{\mu,i})^3 p^3 + 8(T'_{\mu,i})^2 p^2 + 4T'_{\mu,i} p + 1} \cdot \frac{k_{\Pi,i}^*}{k_{c,i} p} = \\ &= \frac{\widehat{k}_{vж,i}^* (4T'_{\mu,i} p + 1)}{p \left[ 8(T'_{\mu,i})^3 p^3 + 8(T'_{\mu,i})^2 p^2 + 4T'_{\mu,i} p + 1 \right]}, \quad i=1,2,3, \end{aligned} \quad (30)$$

где  $\widehat{k}_{vж,i}^*$  – заданный (желаемый) коэффициент усиления по скорости;  
 $k'_{PI,i}$  – требуемый коэффициент усиления П-регулятора положения:

$$k'_{PI,i} = \frac{\widehat{k}_{vж,i}^* k_{c,i}^*}{k_{\varepsilon,i} k_{\Pi,i}^*}. \quad (31)$$

Здесь, как и ранее, коэффициент  $k_{\Pi,i}^*$  учитывается только при наличии в  $i$ -м канале ОС по положению; постоянные времени  $T'_{\mu,i}$  ( $i=1,2,3$ ) заданы соотношением (13).

При моделировании в (30), (31) принято:

$$\widehat{k}_{vж,1}^* = 1,25 \text{ с}^{-1}; \quad \widehat{k}_{vж,2}^* = 1,75 \text{ с}^{-1}; \quad \widehat{k}_{vж,3}^* = 300 \text{ с}^{-1}. \quad (32)$$

Обобщенная схема имитационной компьютерной модели итерационной трехканальной следящей САУ, позволяющая реализовать динамику всех рассмотренных выше типов итерационных трехканальных следящих ЭП (рис. 1-3) с синтезированной типовой, в том числе

подчиненной, настройкой каналов управления в линейных режимах работы их элементов (см. п. 1-10), приведена на рис. 4.

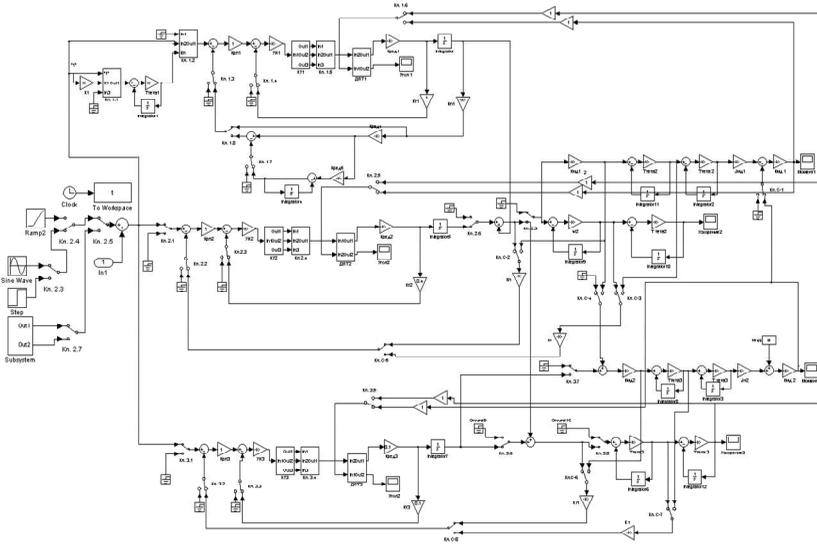


Рис. 4.

Отметим, что разработанная имитационная модель (рис. 4) позволяет при необходимости учитывать влияние на динамику трехканальных следящих ЭП с типовой настройкой момента нагрузки  $M_c(t)$ , приложенного к выходному валу МД2.

**Результаты исследований.** Наиболее показательные результаты сравнительной оценки качества итерационных трехканальных следящих ЭП с рассмотренной типовой настройкой каналов управления приведены в табл. 1-11 и на рис. 5-13.

В таблицах вариант настройки  $B$  трехканальной следящей САУ определяется в соответствии с приведенными выше вариантами настроек ее автономных каналов (см. п. 1-10.). Например, вариант "1-1-1" означает, что все три канала системы настроены в соответствии с п. 1 согласно формулам (1)-(3); вариант "1-8-8" – первый, грубый канал К-1 настроен в соответствии с п. 1, а каналы компенсирующий К-2 и точный К-3 – в соответствии с п. 8 согласно формулам (23)-(26), и.т.д. В табл. 1 и 6 представлены показатели качества переходных процессов (ПП) в автономных замкнутых каналах управления трехканальных электроприводов, а ПП непосредственно в двух- и трехканальной сис-

темах управления электроприводом приведены в табл. 2, 6 и 9.

Таблица 1 – Показатели качества ПП по скорости

№ пп.	Канал	$B$	$v_i^*$	$\sigma_i^*$ , %	$t_{пс.i}^*$	$t_{рег.i}^*$
1	К-1	1	0	7,4	$1,513 \cdot 10^{-3}$	$5,540 \cdot 10^{-3}$
	К-2	1	0	5,9	$1,351 \cdot 10^{-3}$	$5,300 \cdot 10^{-3}$
	К-3	1	0	10,9	$9,042 \cdot 10^{-4}$	$4,952 \cdot 10^{-3}$
2	К-1	2	0	14,1	0,0148	0,0937
	К-2	2	0	16,9	0,0134	0,0666
	К-3	2	0	26,4	$8,619 \cdot 10^{-3}$	0,0394
3	К-1	3	1	22,5	$9,883 \cdot 10^{-5}$	$1,007 \cdot 10^{-3}$
	К-2	3	1	21,5	$8,223 \cdot 10^{-5}$	$8,257 \cdot 10^{-4}$
	К-3	3	1	21,5	$6,140 \cdot 10^{-5}$	$6,339 \cdot 10^{-4}$
4	К-1	4	1	4,3	$2,170 \cdot 10^{-3}$	$4,958 \cdot 10^{-3}$
	К-2	4	1	4,3	$1,737 \cdot 10^{-3}$	$3,958 \cdot 10^{-3}$
	К-3	4	1	4,3	$1,268 \cdot 10^{-3}$	$3,155 \cdot 10^{-3}$
5	К-1	5	2	51,5	$1,581 \cdot 10^{-3}$	$9,014 \cdot 10^{-3}$
	К-2	5	2	51,3	$1,265 \cdot 10^{-3}$	$7,218 \cdot 10^{-3}$
	К-3	5	2	50,5	$9,309 \cdot 10^{-4}$	$5,285 \cdot 10^{-3}$

Результаты сравнительной оценки точностных свойств одно-, двух- и трехканальной систем управления электроприводом во временной и частотной области приведены в табл. 3, 7, 10 и табл. 4, 8, 11 соответственно. В таблицах приняты обозначения:  $v_i$ ,  $v_i^*$  – порядок астатизма по задающему воздействию;  $i=1,2,3$  – индекс;  $\sigma_i$ ,  $\sigma_i^*$  – перерегулирование;  $t_{пс.i}^*$  – время первого согласования по уровню 0,1;  $t_{рег.i}^*$  – время регулирования по уровню 0,5;  $\epsilon_i$  – статическая ошибка воспроизведения при  $U_{sc}(t)=1(t)$ ;  $\epsilon_{Ди}$  – динамическая ошибка воспроизведения входного сигнала при  $U_{zc}(t)=t^2$ ;  $\omega_{Pi}$  – полоса воспроизводимых частот по уровню 0,707.

На рис. 5-13 обозначено: цифрами "1", "2" и "3" – графики динамических характеристик соответственно одно-, двух- и трехканальной систем; пунктирными кривыми и цифрами "Зав" и "Зит" – графики переходных процессов (ПП) в третьем, точном канале К-3, функционирующем в автономном и итерационном режимах работы.

Таблица 2 – Показатели качества ПП по скорости

№ пп.	<i>B</i>	Канал	$V_i$	$\sigma_i$	$t_{пс,i}^*$	$t_{пер,i}^*$	Рисунок
	1-1-1	К-1, К-2	0	46,0	$7,340 \cdot 10^{-4}$	$4,634 \cdot 10^{-3}$	рис. 5, <i>a</i>
		К-1, К-2, К-3	0	75,2	$4,820 \cdot 10^{-4}$	$5,151 \cdot 10^{-3}$	
2	3-3-3	К-1, К-2	2	69,0	$5,293 \cdot 10^{-5}$	$4,999 \cdot 10^{-4}$	рис. 6, <i>a</i>
		К-1, К-2, К-3	3	97,0	$3,586 \cdot 10^{-5}$	$5,491 \cdot 10^{-4}$	
3	5-5-5	К-1, К-2	4	111,8	$9,408 \cdot 10^{-4}$	0,0125	рис. 7, <i>a</i>
		К-1, К-2, К-3	6	145,7	$6,510 \cdot 10^{-4}$	0,0149	

Продолжение таблицы 2

№ пп.	Выигрыш в быстродействии по сравнению с		Выигрыш во времени регулирования по сравнению с	
	К-3	САУ	К-3	САУ
1	1,232	1	1,069	1
	1,876	1,523	0,961	0,90
2	1,160	1	1,268	1
	1,712	1,476	1,154	0,91
3	0,989	1	0,423	1
	1,430	1,445	0,355	0,839

Для различных вариантов настроек итерационных трехканальных следящих электроприводов на рис. 5-13 приведены: *a* – переходные функции; *б* – частотные характеристики; *в* и *г* – отработка параболического входного сигнала; *д* и *е* – отработка синусоидального входного сигнала с частотой 1 и 10 Гц соответственно.

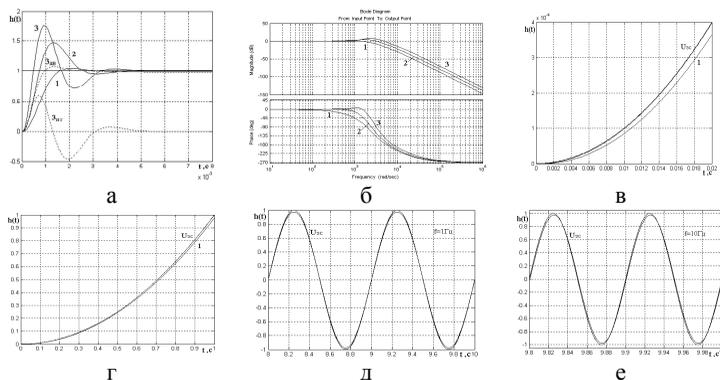


Рис. 5.

Таблица 3 – Динамическая погрешность САУ по задающему воздействию

В	Канал	$\epsilon_i$	$\epsilon_{Di}$ при $t, c$				Выигрыш в точности по сравнению с К-1 при $t, c$		Выигрыш в точности по сравнению с К-1 и К-2 при $t, c$		Рисунок
			0,02	1	5	20	1	20	1	20	
1-1-1	К-1	0,024	$3,52 \cdot 10^{-5}$	0,025	0,611	9,71	1	1	-	-	рис. 5,в рис. 5,г
	К-1, К-2	0,001	$2,21 \cdot 10^{-6}$	$7,30 \cdot 10^{-4}$	0,017	0,27	34,8	36,0	1	1	
	К-1, К-2, К-3	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$9,01 \cdot 10^{-8}$	$2,10 \cdot 10^{-5}$	$5,01 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	1210	1294	34,8	36	
2-2-2	К-1	0,012	$2,27 \cdot 10^{-4}$	0,019	0,341	5,09	1	1	-	-	
	К-1, К-2	$2,01 \cdot 10^{-4}$	$9,60 \cdot 10^{-5}$	$3,75 \cdot 10^{-4}$	$5,60 \cdot 10^{-3}$	0,08	49,6	62,1	1	1	
	К-1, К-2, К-3	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$5,97 \cdot 10^{-6}$	$8,40 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	2214	3245	44,6	52,2	
3-3-3	К-1	0	$7,51 \cdot 10^{-7}$	$6,30 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-3}$	1	1	-	-	рис. 6,в рис. 6,г
	К-1, К-2	0	$1,60 \cdot 10^{-9}$	$1,65 \cdot 10^{-9}$	$1,65 \cdot 10^{-9}$	$1,65 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^9$	$7,89 \cdot 10^5$	1	1	
	К-1, К-2, К-3	0	$4,0 \cdot 10^{-12}$	0	0	0	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	
5-5-5	К-1	0	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$4,50 \cdot 10^{-6}$	1	1	-	-	рис. 7,в рис. 7,г

Таблица 4 – Качество воспроизведения задания по скорости

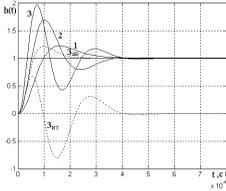
В	Канал	$\omega_{П,i}$		Расширение полосы пропус- кания по сравне- нию с К-1, <i>раз</i>	Расширение полосы пропус- кания по сравне- нию с К-1, К-2, <i>раз</i>	Рисунок
		Гц	рад/с			
1-1-1	К-1	343,8	$2,16 \cdot 10^3$	1	-	рис. 5,б
	К-1, К-2	628,8	$3,95 \cdot 10^3$	1,82	1	
	К-1, К-2, К-3	926,5	$5,82 \cdot 10^3$	2,70	1,47	
2-2-2	К-1	30,7	193	1	-	
	К-1, К-2	56,4	354	1,83	1	
	К-1, К-2, К-3	84,7	532	2,76	1,50	
3-3-3	К-1	4935	$3,10 \cdot 10^4$	1	-	рис. 6,б
	К-1, К-2	8580	$5,39 \cdot 10^4$	1,74	1	
	К-1, К-2, К-3	12290	$7,72 \cdot 10^4$	2,49	1,43	
5-5-5	К-1	308,8	$1,94 \cdot 10^3$	1	-	рис. 7,б
	К-1, К-2	493,4	$3,10 \cdot 10^3$	1,61	1	
	К-1, К-2, К-3	692,3	$4,35 \cdot 10^3$	2,24	1,40	

Таблица 5 – Ошибки воспроизведения синусоидального сигнала.

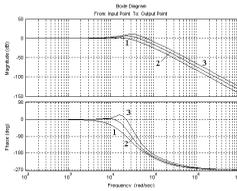
В	Канал	Запаздывание по фазе <i>рад</i> (угл. град) на частоте <i>f</i> , Гц			Запаздывания по фазе по сравнению с К-1 (разы) на частоте <i>f</i> , Гц		Запаздывания по фазе по сравнению с К-1, К-2 (разы) на частоте <i>f</i> , Гц		Рисунок
		1	4	10	1	10	1	10	
1-1-1	К-1	$4,08 \cdot 10^{-3}$ (0,234)	0,0163 (0,934)	0,0408 (2,34)	1	1	-	-	рис.5,д рис.5,е
	К-1, К-2	$1,95 \cdot 10^{-4}$ (0,011)	$7,79 \cdot 10^{-4}$ (0,0446)	$1,95 \cdot 10^{-3}$ (0,112)	20,9	20,9	1	1	
	К-1, К-2, К-3	$6,57 \cdot 10^{-6}$ (3,810 <sup>-4</sup> )	$2,45 \cdot 10^{-5}$ (1,4 · 10 <sup>-3</sup> )	$3,8 \cdot 10^{-5}$ (2,1 · 10 <sup>-3</sup> )	621	1082	29,8	51,7	
2-2-2	К-1	0,02 (1,14)	0,117 (6,70)	0,476 (27,27)	1	1	-	-	
	К-1, К-2	$3,8 \cdot 10^{-4}$ (0,0216)	$8,0 \cdot 10^{-3}$ (0,461)	0,0267 (1,53)	52,5	17,8	1	1	
	К-1, К-2, К-3	$3,6 \cdot 10^{-6}$ (2,1 · 10 <sup>-4</sup> )	$5,4 \cdot 10^{-4}$ (0,0310)	0,0449 (2,57)	5480	10,6	104	0,60	

Продолжение таблицы 5

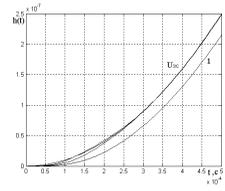
3-3-3	K-1	$1,98 \cdot 10^{-4}$ (0,0113)	$1,25 \cdot 10^{-3}$ (0,072)	$1,9 \cdot 10^{-3}$ (0,113)	1	1	-	-	рис.6, <i>д</i> рис.6, <i>е</i>
	K-1, K-2	$3,1 \cdot 10^{-10}$ ( $1,8 \cdot 10^{-8}$ )	$7,5 \cdot 10^{-10}$ ( $4,3 \cdot 10^{-8}$ )	$1,01 \cdot 10^{-8}$ ( $5,7 \cdot 10^{-7}$ )	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^5$	1	1	
	K-1, K-2, K-3	$3,52 \cdot 10^{-9}$ ( $2,0 \cdot 10^{-7}$ )	$9,2 \cdot 10^{-9}$ ( $5,37 \cdot 10^{-7}$ )	$2,70 \cdot 10^{-8}$ ( $1,5 \cdot 10^{-6}$ )	56240	73330	0,09	0,37	
5-5-5	K-1	$7,8 \cdot 10^{-7}$ ( $4,5 \cdot 10^{-5}$ )	$5,7 \cdot 10^{-5}$ ( $3,2 \cdot 10^{-3}$ )	$7,98 \cdot 10^{-4}$ (0,046)	1	1	-	-	рис.7, <i>д</i> рис.7, <i>е</i>
	K-1, K-2	$6,3 \cdot 10^{-11}$ ( $3,6 \cdot 10^{-9}$ )	$8,8 \cdot 10^{-8}$ ( $5,0 \cdot 10^{-6}$ )	$8,61 \cdot 10^{-6}$ ( $4,9 \cdot 10^{-4}$ )	12500	92,7	1	1	
	K-1, K-2, K-3	$6,2 \cdot 10^{-15}$ ( $3,6 \cdot 10^{-13}$ )	$2,5 \cdot 10^{-12}$ ( $1,4 \cdot 10^{-10}$ )	$3,5 \cdot 10^{-8}$ ( $2,0 \cdot 10^{-6}$ )	$125 \cdot 10^6$	22290	$1 \cdot 10^4$	241	



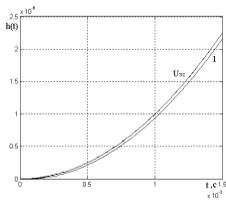
а



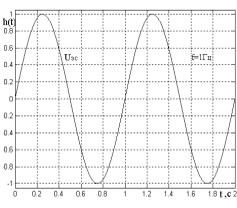
б



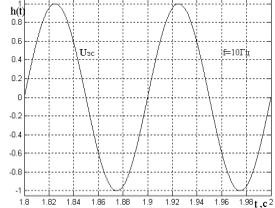
в



г



д



е

Рис. 6.

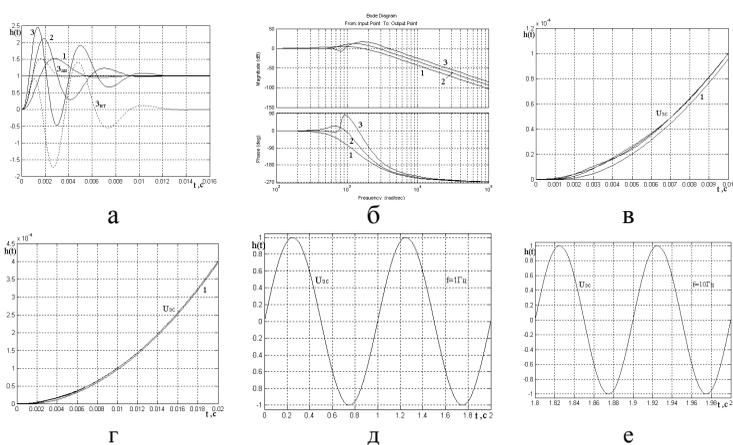


Рис. 7.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что трехканальные следящие ЭП, построенные и функционирующие по итерационному принципу, обладают новыми, кардинально улучшенными качественными показателями по сравнению с традиционными одноканальными типовыми следящими ЭП.

Так, итерационные трехканальные следящие ЭП типа *"скорость-скорость"* с подчиненной настройкой контуров токов автономных каналов обладают астатизмом по управлению не ниже третьего порядка ( $\nu_3 \geq 3$ ) и обрабатывают задающие воздействия на порядок лучше аналогичных трехканальных ЭП с разомкнутыми внутренними контурами каналов (табл. 1-4 и рис. 5-7).

Наилучшие результаты по быстродействию и динамической точности воспроизведения задающих воздействий, которые могут быть получены в рассмотренных вариантах таких систем, дает применение в контурах скорости автономных каналов активных последовательных ДКУ. Соответствующая трехканальная система с подчиненными контурами токов, настроенными на ТО, обеспечивает при допустимом перерегулировании время первого согласования по скорости на уровне  $t_{пс,3} = 3,59 \cdot 10^{-5}$  с и полосу пропускания свыше 12 кГц (рис. 6). В случае же применения в контурах скорости аналогичных ИКУ может быть обеспечена наименьшая установившаяся ошибка в системе (табл. 3). Однако при этом существенно сужаются полосы пропускания автономных каналов, что негативно ска-

зывается на таких показателях качества трехканального следящего ЭП как быстродействие и динамическая точность (табл. 2 и 4).

Из табл. 1-4 также нетрудно видеть, что при любых рассмотренных типовых настройках каналов полосы пропускания соответствующих трехканальных ЭП типа "скорость-скорость" расширяются более чем в 2,2 раза, а их быстродействие, определяемое по времени первого согласования  $t_{пс,3}$ , возрастает более чем в 2,1 раза по сравнению с аналогичными одноканальными следящими системами (первым грубым каналом К-1). При настройке же автономных каналов на СО порядок астатизма трехканальной системы достигает  $\nu_3 = 6$ , а ее быстродействие по сравнению даже с автономным третьим, точным каналом К-3 возрастает в 1,43 раза при сохранении требуемых запасов устойчивости в системе (рис. 7). Это потенциально определяет высочайшие динамические свойства трехканальных следящих ЭП типа "скорость-скорость".

В табл. 6-12 приведены сравнительные оценки качества итерационных трехканальных следящих ЭП. Время первого согласования по уровню 0,1 % обозначено  $t_{пс,i}^*$ , время регулирования по уровню 0,5 % обозначено  $t_{рег,i}^*$ .

Таблица 6 – Показатели качества ПП по положению

№ п/п	Канал	$B$	$\nu_i^*$	$\sigma_i^*$	$t_{пс,i}^*$	$t_{рег,i}^*$
1	К-1	6	1	0	19,669	15,085
	К-2	6	1	0	9,707	7,442
	К-3	6	1	0	0,0424	0,0349
2	К-1	8	1	0	0,350	0,266
	К-2	8	1	0	0,278	0,213
	К-3	8	1	0	$6,650 \cdot 10^{-4}$	$2,785 \cdot 10^{-3}$
3	К-1	9	1	0	4,60	3,530
	К-2	9	1	0	3,460	2,650
	К-3	9	1	0,5	$3,388 \cdot 10^{-3}$	$3,830 \cdot 10^{-3}$
4	К-1	10	1	0	5,560	4,245
	К-2	10	1	0	3,940	3,030
	К-3	10	1	0	0,0242	0,0185

Таблица 7 – Показатели качества ПП САУ по положению

№ пп	<i>B</i>	Канал	$v_i$	$\sigma_i$	$t_{nc,i}$	$t_{pez,i}$	Рисунок
1	6-6-6	К-1, К-2	2	12,5	1,952	14,984	рис. 8, <i>a</i>
		К-1, К-2, К-3	3	1,0	0,0308	0,887	
2	8-8-8	К-1, К-2	2	13,2	0,0448	0,321	рис. 9, <i>a</i>
		К-1, К-2, К-3	3	0,94	$5,998 \cdot 10^{-4}$	0,0215	
3	10-10-10	К-1, К-2	2	13,3	0,671	4,866	рис. 10, <i>a</i>
		К-1, К-2, К-3	3	0,93	0,0158	0,297	

Продолжение таблицы 7.

№ пп	Выигрыш по быстродействию по сравнению с К-3, <i>раз</i>	Выигрыш по быстродействию по сравнению с К-1, К-2, <i>раз</i>	Выигрыш по времени регулирования по сравнению с К-3, <i>раз</i>	Выигрыш по времени регулирования по сравнению с К-1, К-2, <i>раз</i>
1	0,022	1	$2,33 \cdot 10^{-3}$	1
	1,38	63,4	0,039	16,9
2	0,015	1	$8,67 \cdot 10^{-3}$	1
	1,11	74,7	0,130	14,9
3	0,036	1	$3,80 \cdot 10^{-3}$	1
	1,53	42,5	0,062	16,4

Таблица 8 – Динамическая погрешность по задающему воздействию

<i>B</i>	Канал	$\epsilon_i$	$\epsilon_{Di}$ при <i>t</i> , с				Выигрыш по точности по сравнению с К-1, <i>раз</i> при <i>t</i> , с		Выигрыш по точности по сравнению с К-1, К-2, <i>раз</i> при <i>t</i> , с		Рисунок
			1	5	10	20	1	20	1	20	
			6-6-6	К-1	0	0,89	15,07	41,23	97,7	1	
К-2	0	0,71		5,51	7,55	8	1,26	12,2	1	1	
К-1, К-2, К-3	0	0,012		$8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	75,7	$1,95 \cdot 10^6$	60,3	$1,6 \cdot 10^5$	
8-8-8	К-1	0	0,09	0,49	0,99	2,06	1	1	-	-	рис.9, <i>б</i> рис.9, <i>г</i>
	К-2	0	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	23,8	515	1	1	
	К-1, К-2, К-3	0	$1 \cdot 10^{-10}$	0	0	0	$9,5 \cdot 10^8$	$\infty$	$4 \cdot 10^7$	$\infty$	
10-10-10	К-1	0	0,687	6,72	14,72	30,72	1	1	-	-	рис.10, <i>б</i> рис.10, <i>г</i>
	К-2	0	0,395	0,909	0,914	0,914	1,74	33,6	1	1	

	К-1, К-2, К-3	0	1,50 $10^{-3}$	2,40 $10^{-5}$	5,0 $10^{-8}$	0	458	$\infty$	263	$\infty$	
--	---------------------	---	-------------------	-------------------	------------------	---	-----	----------	-----	----------	--

Таблица 9 – Качество воспроизведения задания по положению

№ пп	В	Канал	$\Omega_{Pi}$		Расширение полосы пропускания по сравне- нию с К-1, раз	Расширение полосы пропускания по сравне- нию с К-1, К-2, раз	Рисунок
			$G_{\Omega}$	рад/с			
1	6-6-6	К-1	0,0557	0,35	1	-	рис. 8,б
		К-1, К-2	0,205	1,29	3,69	1	
		К-1, К-2, К-3	21,96	138	394	107	
2	8-8-8	К-1	3,17	19,9	1	-	рис. 9,б
		К-1, К-2	8,75	55,0	2,76	1	
		К-1, К-2, К-3	923,1	5800	291,5	105,5	
3	10-10-10	К-1	0,197	1,24	1	-	рис. 10,б
		К-1, К-2	0,594	3,73	3,0	1	
		К-1, К-2, К-3	54,43	342	276	91,7	

Продолжение таблицы 9.

№ пп	Запаздывание по фазе, рад (угл. град) при $f, G_{\Omega}$		Запаздывание по фазе по сравнению с К-1, раз		Запаздывание по фазе по сравнению с К-1, К-2, раз			Рисунок
	1	4	10	1	10	1	10	
1	1,59 (90,9)	1,64 (93,7)	1,94 (110,9)	1	1	-	-	рис.8,д, рис.8,е
	1,45 (82,8)	1,61 (92,1)	1,72 (98,3)	1,1	1,1	1	1	
	0,0609 (3,49)	0,249 (14,3)	0,610 (34,9)	26,1	3,2	23,8	2,8	
2	0,304 (17,4)	0,892 (51,1)	1,24 (71,3)	1	1	-	-	рис.9,д, рис.9,е
	0,0364 (2,09)	0,530 (30,4)	1,04 (59,8)	8,4	1,2	1	1	
	9,43 $10^{-5}$ (5,40 $10^{-3}$ )	4,27 $10^{-4}$ (0,0245)	0,0102 (0,585)	3226	122	386	102	
3	1,38 (78,8)	1,52 (87,1)	1,55 (88,9)	1	1	-	-	рис.10,д, рис.10,е
	1,22 (69,8)	1,48 (84,8)	1,53 (87,8)	1,1	1,01	1	1	

	0,0176 (1,01)	0,0829 (4,75)	0,207 (11,9)	78,4	7,5	69,3	7,4	
--	------------------	------------------	-----------------	------	-----	------	-----	--

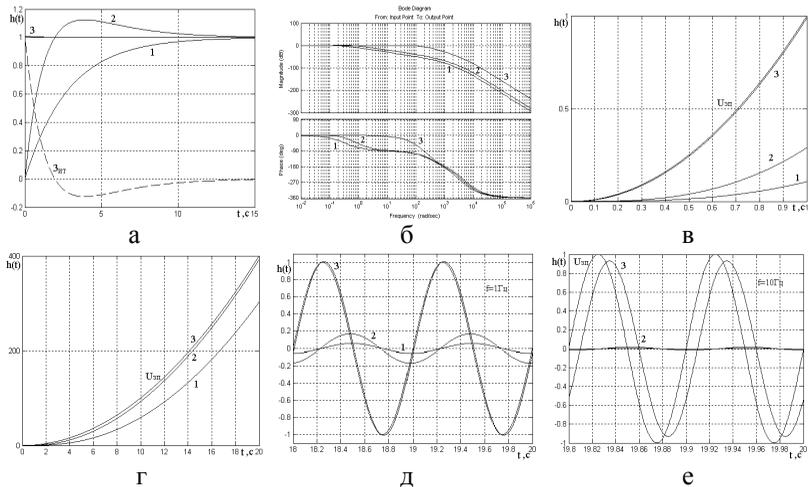
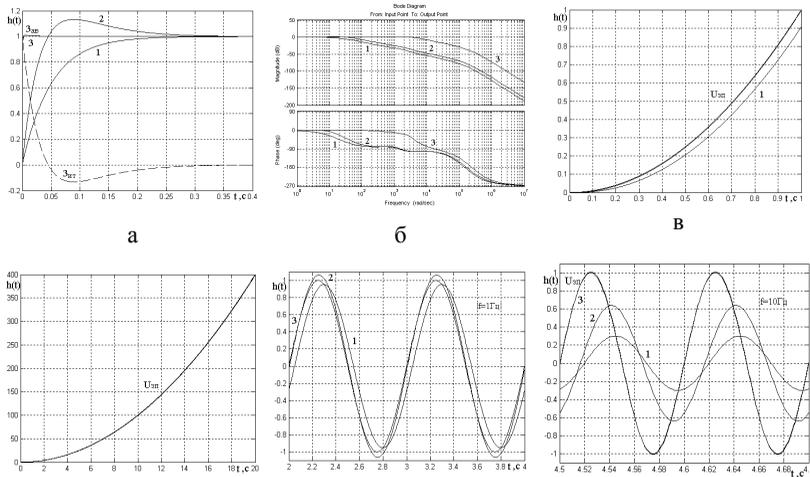


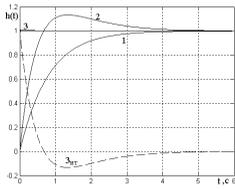
Рис. 8.



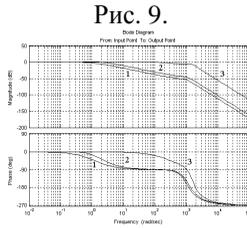
Г

Д

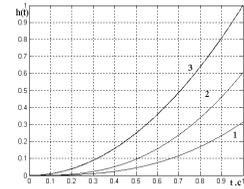
е



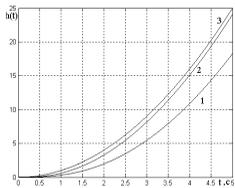
а



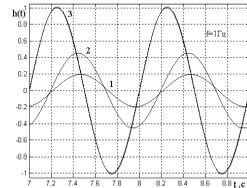
б



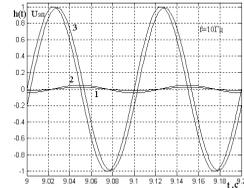
в



г



д



е

Рис. 10.

Таблица 10 –Показатели качества ПП по положению

№ пп	<i>B</i>	Канал	$v_i$	$\sigma_i$	$t_{nc,i}$	$t_{рег,i}$	Рисунок
1	1-6-6	К-1, К-2, К-3	1	0	6,465	4,961	рис. 11, <i>a</i>
			2	1,0	0,0308	0,761	
2	3-8-8	К-1, К-2	2	0	0,156	0,119	рис. 12, <i>a</i>
		К-1, К-2, К-3	3	0,94	$5,995 \cdot 10^{-4}$	0,0170	
3	5-10-10	К-1, К-2	2	0	2,303	1,766	рис. 13, <i>a</i>
		К-1, К-2, К-3	3	0,91	0,0158	0,234	

Продолжение таблицы 10

№ пп	Выигрыш по быстродействию по сравнению с К-3, <i>раз</i>	Выигрыш по быстродействию по сравнению с К-1 и К-2, <i>раз</i>	Выигрыш во времени регулирования по сравнению с К-3, <i>раз</i>	Выигрыш во времени регулирования по сравнению с К-1, К-2, <i>раз</i>
1	$6,57 \cdot 10^{-3}$	1	$7,03 \cdot 10^{-3}$	1
	1,38	210	0,049	6,93
2	$4,26 \cdot 10^{-3}$	1	0,0234	1
	1,11	260	0,164	7
3	0,0106	1	0,0105	1

	1,54	146	0,0790	7,54
--	------	-----	--------	------

Таблица 11 – Динамическая точность по задающему воздействию

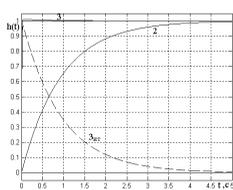
В	Канал	$\epsilon_i$	$\epsilon_{n,i}$ при $t, c$				Выигрыш в точности по сравнению с К-1, раз		Выигрыш в точности сравнено с К-1, К-2, раз		Рисунок
			1	5	10	20	1	20	1	20	
1-6-6	К-1	0	0,026	0,61	2,43	9,65	1	1	-	-	рис.11,б рис.11,г
	К-1, К-2	0	0,018	0,18	0,413	0,88	1,39	11,0	1	1	
	К-1, К-2, К-3	0	$2,94 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	86,7	21440	62,2	1956	
3-8-8	К-1	0	$6,50 \cdot 10^{-5}$	$3,50 \cdot 10^{-4}$	$6,50 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-3}$	1	1	-	-	рис.12,б рис.12,г
	К-1, К-2	0	$1,50 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$2,50 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	43,3	433	1	1	
	К-1, К-2, К-3	0	$1,0 \cdot 10^{-11}$	0	0	0	$6,5 \cdot 10^6$	$\infty$	$1,5 \cdot 10^5$	$\infty$	
5-10-10	К-1	0	$2,60 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$2,55 \cdot 10^{-3}$	$5,15 \cdot 10^{-3}$	1	1	-	-	рис.13,б рис.13,г
	К-1, К-2	0	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$8,50 \cdot 10^{-5}$	$8,50 \cdot 10^{-5}$	3,25	60,6	1	1	
	К-1, К-2, К-3	0	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$1,10 \cdot 10^{-9}$	0	0	6500	$\infty$	2000	$\infty$	

Таблица 12 – Качество воспроизведения задания по положению

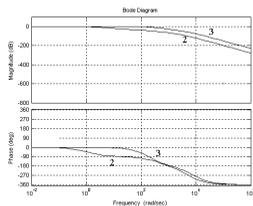
№ пп	В	Канал	$\omega_{П,i}$		Расширение полосы пропускания по сравнению с К-1, К-2, раз	Рисунок
			Гц	рад/с		
1	1-6-6	К-1	-	-	-	рис.11,б
		К-1, К-2	0,170	1,07	1	
		К-1, К-2, К-3	21,96	138	129	
2	3-8-8	К-1	-	-	-	рис.12,б
		К-1, К-2	7,04	44,2	1	
		К-1, К-2, К-3	920,1	5781	131	
3	5-10-10	К-1	-	-	-	рис.13,б
		К-1, К-2	0,447	3,0	1	
		К-1, К-2, К-3	54,0	339	113	

Продолжение таблицы 12

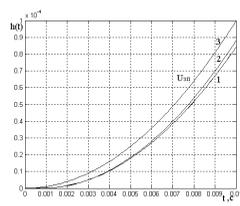
№ пп	Запаздывание по фазе, рад (угл. градус) при $f, Гц$			Запаздывание по фазе по сравнению с К-1, рад		Запаздывание по фазе по сравнению с К-1, К-2, рад		Рисунок
	1	4	10	1	10	1	10	
1-6-6	$8,48 \cdot 10^{-3}$ (0,486)	0,0177 (1,014)	0,0446 (2,56)	1	1	-	-	рис.11,д рис.11,е
	$4,87 \cdot 10^{-3}$ (0,279)	0,0181 (1,037)	0,0434 (2,49)	1,74	1,03	1	1	
	$1,48 \cdot 10^{-3}$ (0,0848)	$6,28 \cdot 10^{-3}$ (0,360)	0,0224 (1,28)	5,73	2,0	3,29	1,94	
3-8-8	$2,39 \cdot 10^{-4}$ (0,0137)	$9,55 \cdot 10^{-4}$ (0,0547)	$2,32 \cdot 10^{-3}$ (0,133)	1	1	-	-	рис.12,д рис.12,е
	$4,24 \cdot 10^{-6}$ (2,43 $10^{-4}$ )	$2,01 \cdot 10^{-4}$ (0,0115)	$1,45 \cdot 10^{-3}$ (0,0828)	56,3	1,61	1	1	
	$4,40 \cdot 10^{-8}$ (2,52 $10^{-6}$ )	$2,20 \cdot 10^{-6}$ (1,26 $10^{-4}$ )	$1,45 \cdot 10^{-5}$ (8,28 $10^{-4}$ )	5430	160,5	96,4	100	
5-10-10	$2,36 \cdot 10^{-3}$ (0,135)	$6,28 \cdot 10^{-3}$ (0,360)	0,0157 (0,90)	1	1	-	-	рис.13,д рис.13,е
	$9,24 \cdot 10^{-4}$ (0,0529)	$9,05 \cdot 10^{-4}$ (0,0518)	$2,20 \cdot 10^{-3}$ (0,126)	2,56	7,14	1	1	
	$1,04 \cdot 10^{-5}$ (5,94 $10^{-4}$ )	$8,80 \cdot 10^{-5}$ (5,04 $10^{-3}$ )	$1,70 \cdot 10^{-3}$ (0,0970)	228	9,24	89,1	1,29	



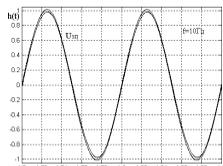
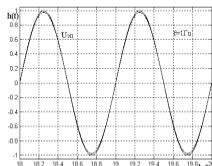
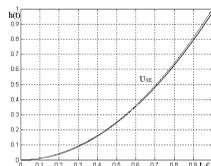
а



б



в

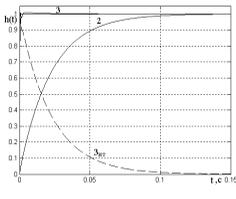


Г

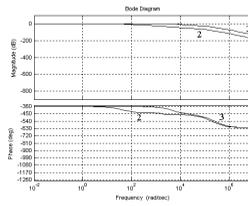
Д

е

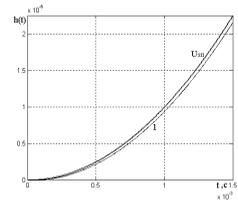
Рис. 11.



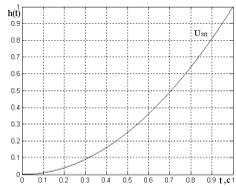
а



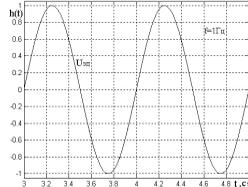
б



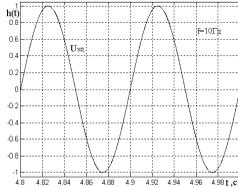
в



Г

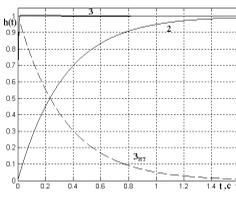


Д

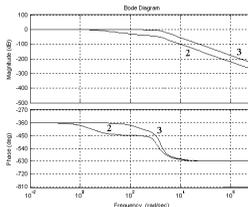


е

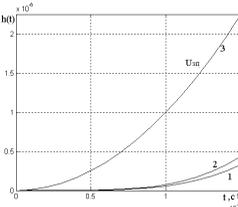
Рис. 12.



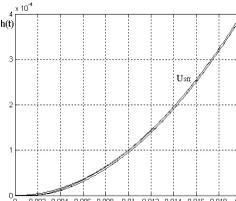
а



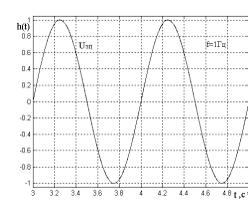
б



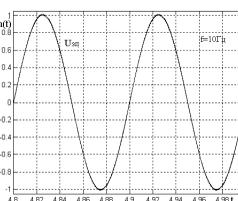
в



Г



Д



е

Рис. 13

Трехканальные позиционные ЭП типа "угол-угол" (табл. 6-9 и рис.

8-10) и "*скорость-угол*" (табл. 10-12 и рис. 11-13) при любых рассмотренных типовых настройках автономных каналов обладают астатизмом по управлению третьего порядка ( $\nu_3 = 3$ ), что указывает на их высокие потенциальные точностные возможности.

В таких системах, как и в соответствующих трехканальных следящих ЭП типа "*скорость-скорость*", наилучшие результаты по быстродействию и динамической точности могут быть достигнуты при использовании во внешних контурах автономных каналов активных последовательных ДКУ и применении подчиненной настройки внутренних контуров скорости. В этом случае в трехканальных позиционных системах с подчиненными контурами скорости, настроенными на ТО, без снижения запасов устойчивости обеспечивается время первого согласования по положению на уровне  $t_{пс,3} = 5,998 \cdot 10^{-4}$  с (что почти на 10 % меньше аналогичного показателя для автономного третьего, точного канала К-3) и достигается полоса пропускания свыше 900 Гц (рис. 9).

Высокие показатели качества функционирования трехканальных позиционных ЭП наблюдаются и при применении П-регуляторов положения в автономных каналах управления (рис. 10).

Кроме того, для трёхканальных систем типа "*угол-угол*" из табл. 5,6 и табл. 8 видно, что для рассмотренных типовых настроек каналов управления полосы пропускания соответствующих двухканальных ЭП расширяются более чем в 2,7 раза, а трехканальных ЭП – более чем в 270 раз по сравнению с аналогичными одноканальными позиционными системами (первым, грубым каналом К-1). Возрастает и быстродействие двух- и трехканальных следящих ЭП типа "*угол-угол*" соответственно более чем в 7,5 раза и более чем в 350 раз по сравнению с аналогичными одноканальными САУ.

Из сравнения результатов, приведенных в табл. 6,8 и табл. 9, 11, следует, что для соответствующих трехканальных ЭП типа "*угол-угол*" и "*скорость-угол*" такие показатели качества как ширина полос пропускания и быстродействие, определяемое по времени  $t_{пс,3}$ , практически совпадают для обоих типов систем. Однако между многоканальными позиционными ЭП типа "*угол-угол*" и "*скорость-угол*" есть и существенные отличия.

Сравнительный анализ качества функционирования таких систем, выполненный на основании показателей, приведенных соответственно в табл. 6, 7 и табл. 9, 10, показывает, что в двух- и трехканальных следящих ЭП типа "*скорость-угол*" по сравнению с аналогичными ЭП типа "*угол-угол*" дополнительно может быть обеспечено:

а) уменьшение времени регулирования ПП (в зависимости от типовых настроек каналов): в 2,5-3 раза – для двухканальных ЭП и на 20-25 % – для трехканальных ЭП. При этом для двухканальных ЭП, функционирующих в составе трехканальных систем типа "*скорость-угол*" ПП по положению приобретает аperiodический характер вместо монотонного характера при их функционировании в составе трехканальных систем типа "*угол-угол*" (рис. 8,а-10,а и рис. 11,а-13,а);

б) повышение динамической точности воспроизведения задающего воздействия (в зависимости от типовых настроек каналов): на порядок и более – для двух- и трехканальных ЭП с типовыми КУ и разомкнутыми внутренними контурами каналов управления, и более чем на два порядка – для двух- и трехканальных ЭП с типовой подчиненной настройкой каналов управления (см. рис. 8,в,...,е – 10, в,...,е и рис. 11, в,...,е - 13, в,...,е).

Вместе с тем, как незначительный негативный факт необходимо отметить, что на уровне двухканальных позиционных ЭП, функционирующих в составе трехканальных систем типа "*скорость-угол*", полоса воспроизводимых частот сужается на 19-22 % (в зависимости от типовой настройки каналов) по сравнению с двухканальными ЭП, функционирующими в составе аналогичных трехканальных систем типа "*угол-угол*".

В целом же при отсутствии существенных труднокомпенсируемых помех и возмущений во втором К-2 и третьем К-3 каналах управления точность итерационных трехканальных следящих ЭП типа "*угол-угол*" и "*скорость-угол*" практически может быть ограничена только точностными возможностями передаточных и исполнительных механизмов и устройств, в частности дифференциальных редукторов МД1 и, особенно, МД2, а также разрешающей способностью используемого датчика перемещения рабочего органа.

### **Выводы.**

1. Теоретические и компьютерные исследования показали, что итерационные трехканальные следящие ЭП с типовой настройкой каналов обладают новыми, кардинально улучшенными показателями качества управления по сравнению не только с традиционными одноканальными типовыми следящими ЭП, но и с итерационными двухканальными следящими системами.

2. В трехканальных следящих системах любого из рассмотренных типов значительно больший эффект повышения качества управления достигается при замыкании внутренних ОС и подчиненной настройке контуров управления ЭП автономных каналов. В качестве регуляторов

могут быть использованы как обычные типовые П- и ПИ-регуляторы, так и типовые дифференцирующие или интегрирующие КУ во внешних контурах.

3. Применение ДКУ даёт наилучшие результаты по быстродействию и точности управления в сложных динамических режимах работы следящих ЭП. Применение ИКУ, обеспечивающих наилучшую установленную точность, но сужающих полосы пропускания автономных каналов, целесообразно только в статических (стабилизирующих) ЭП или при наличии существенных труднокомпенсируемых помех в автономных следящих каналах управления.

4. Итерационный трехканальный следящий ЭП типа "*скорость-скорость*" при настройке его каналов на технический оптимум обладает астатизмом по управлению третьего порядка ( $v_3 = 3$ ), а при настройке каналов на симметричный оптимум, – шестого порядка ( $v_3 = 6$ ) при сохранении требуемых запасов устойчивости в системе, что потенциально определяет высочайшую динамическую точность таких ЭП.

5. Итерационные трехканальные позиционные ЭП с типовой настройкой имеют существенные преимущества перед обычными типовыми позиционными системами по быстродействию, динамической и установившейся точности, обладая астатизмом третьего порядка и более чем в 200 раз большей (при определенных настройках каналов) полосой пропускаемых частот без ухудшения качества ПП в автономных приводах отдельных каналов. При этом с точки зрения максимального повышения динамической точности управления комбинированные итерационные трехканальные позиционные системы типа "*скорость-угол*" оказываются даже более предпочтительными, чем классические итерационные трехканальные позиционные системы типа "*угол-угол*".

6. В целом в итерационных трехканальных следящих ЭП типа "*угол-угол*" и "*скорость-угол*" может быть реализована точность управления, удовлетворяющая самым высоким техническим требованиям. При любых типовых настройках каналов достижение максимально возможной точности управления практически ограничивается только точностными возможностями передаточных и исполнительных механизмов и устройств, а также разрешающей способностью используемых датчиков основных координат.

7. Структура итерационных трехканальных следящих ЭП сравнительно проста (даже при учете взаимовлияния каналов по нагрузке), а их расчет и оптимизация не вызывают особых трудностей.

К недостаткам итерационных трехканальных следящих ЭП вращения с типовой настройкой каналов следует отнести необходимость на-

личия в них трёх отдельных приводов требуемой мощности, одного или двух (в зависимости от реализации исполнительного устройства движений системы) высококачественных дифференциальных редукторов, в том числе одного МД – прецизионной точности, и одного высокоточного (доли микрона) датчика положения исполнительного органа. Кроме того, разработка и эксплуатация таких многоканальных ЭП требует высокой культуры производства.

Применение итерационных трехканальных следящих ЭП целесообразно в тех случаях, когда требуется очень высокая динамическая точность воспроизведения задающего воздействия при значительных нагрузках на выходе одноканальной следящей системы (первого, грубого канала К-1) и сравнительно высокой инерционности ее элементов или при наличии существенных труднокомпенсируемых (в том числе с помощью итерационных двухканальных систем) помех в контуре управления.

**Список литературы: 1.** Осмоловский П.Ф. Итерационные многоканальные системы автоматического управления. – М.: Сов. Радио, 1969. – 256 с. **2.** Осмоловский П.Ф., Худяев А.А., Руденко В.Е. Синтез и оценка эффективности последовательно-оптимальной двухканальной следящей системы с итерационной структурой // Вестник ХПИ. Сб. науч. трудов. "Техническая кибернетика и ее приложения. – Харьков: ХГУ "Вища школа", 1989. – Вып. 9. – № 263. – С. 17-22. **3.** Проектирование многоканальных систем оптимального управления / Б.И. Кузнецов, Б.В. Новоселов, И.Н. Богаенко, Н.А. Рюмшин. – К.: Техніка, 1993. – 245 с. **4.** Многоканальные итерационные системы управления: Учебное пособие / Б.И. Кузнецов, А.А. Худяев, И.Н. Богаенко и др. – К.: НПК "КИА", 1998. – 224 с. **5.** Худяев А.А., Гвоздева Е.В. Автоматизированное проектирование итерационных многоканальных систем с эталонной настройкой каналов // Вестник ХГПУ. Сб. науч. трудов. Харьков: ХГПУ, 2000. – №113. – С. 49-56. **6.** Худяев А.А., Прокoppenko Е.А. Итерационный принцип повышения точности систем автоматического управления при наличии помех // Математичне моделювання. – 2001. – № 2(7). – С. 11-14. **7.** Худяев А.А., Литвиненко Д.Г. Итерационные трехканальные следящие системы с подчиненным управлением // Електронформ. Тем. випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика". – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 134-137. **8.** Худяев О.А., Василець Т.Ю., Тищенко О.О. Комплектный электропривод: Навчально-методичний посібник. – Харків: УПА, 2003. – 40 с.

*Поступила в редколлегию 9.12.2010*