УДК 681.5.012: 681.513.3

К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ В КЛАССЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ВОСПРОИЗВОДЯЩИХ СИСТЕМ С ЭТАЛОННОЙ НАСТРОЙКОЙ КАНАЛОВ

Худяев А.А., к.т.н., декан ЭМ факультета Украинской инженерно-педагогической академии.
Украина, 61003, м. Харьков, ул. Университетская, 16, УИПА, тел. (0572) 20-64-05.

У рамках розв'язання проблеми підвищення точності відтворення задавальних впливів розглянуто ефективний нерівноточний ітераційний алгоритм побудови багатоканальних систем керування. Сформульовано метод еталонних операторів каналів. Наведені співвідношення для помилок і структурні схеми нерівноточної ітераційної двоканальної відтворюючої системи.

В рамках решения проблемы повышения точности воспроизведения задающих воздействий рассмотрен эффективный неравноточный итерационный алгоритм построения многоканальных систем управления. Сформулирован метод эталонных операторов каналов. Приведены соотношения для ошибок и структурные схемы неравноточной итерационной двухканальной воспроизводящей системы.

В настоящее время ко многим системам автоматического управления, в том числе к воспроизводящим системам, предъявляются все более высокие требования в отношении полосы пропускаемых частот, порядка астатизма, установившейся динамической точности, максимального ускорения и других динамических показателей.

Воспроизводящие системы, обладающие высокой динамической точностью, необходимы для управления современными быстропротекающими производственными процессами, а также для создания разного рода информационно-измерительных и контролирующих устройств. Известно, что возможности системы в отношении динамической точности в конечном счете определяются предельными значениями координат и производных координат, характеризующих поведение входящих в систему элементов. В первую очередь важны ограничения, наложенные на скорости и ускорения, а иногда, и на рывки привода системы. В одноканальных САУ эти ограничения часто не позволяют увеличивать динамическую точность системы и полосу пропускаемых ею частот до требуемых значений.

Для повышения точности воспроизведения полезного сигнала могут быть использованы многоканальные системы, работающие по замкнутому и разомкнутому циклам [1]. Последующее развитие таких систем привело к созданию многоканальных систем, построенных по принципу "грубого" и "точного" управления и получивших название *итерационных* многоканальных систем [2]. В классе итерационных многоканальных систем воспроизведение задающих воздействий осуществляется последовательными приближениями (итерациями), реализуемыми соответствующими каналами управления [2,3]. Это позволяет потенциально обеспечить максимально высокую заданную точность работы всей многоканальной системы при стандартных (эталонных) настройках отдельных каналов и в большинстве случаев получать качество воспроизведения, недостижимое в одноканальных системах управления [4 - 6].

В настоящей статье рассмотрим принципиальную возможность эффективного решения проблемы повышения точности воспроизведения полезного сигнала при наличии аддитивных возмущений в подклассе неравноточных многоканальных систем с эталонной настройкой каналов, взаимодействующих по итерационному алгоритму. В частности, решим задачу удобного формального описания неравноточного итерационного алгоритма функционирования многоканальных САУ при наличии помех.

1 НЕРАВНОТОЧНЫЙ ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Практическое применение при создании итерационных систем управления получили так называемые *неравноточные итерационные алгоритмы* построения [7–9], благодаря сравнительной простоте их технической реализации. В таких системах каждый последующий i-й канал вносит поправку $\acute{o}_i^*(t)$ в сформированное предшествующими (i-1)-им каналами текущее значение $\acute{o}_{i-1}$ воспроизводимого сигнала, повышая эффективность системы по i-му выходу. При этом процесс воспроизведения итерационной N-канальной линейной системой полезного сигнала $x(t)$ с учетом влияния аддитивных помех в каналах может быть описан рекуррентными соотношениями вида

$$y_i(t) = y_{i-1}(t) + y_i^*(t), \qquad (1)$$

$$y_i^*(t) = \int_{t_0}^{t} w_i^*(t-\tau_i)\left[x(\tau_i) - y_{i-1}(\tau_i) + f_i(\tau_i)\right]d\tau_i$$

$$\forall i = \overline{1,N}, \qquad (2)$$

где $y_i(t)$ - i-ое приближение к $x(t)$, $y_0(t) = 0$; $y_N(t) \equiv y(t)$ - сигнал на выходе N-канальной системы; $y_i^*(t)$ - поправка, вносимая на i-ом этапе итераций; $w_i^*(t)$ - функция веса i-го замкнутого канала; $f_i(t)$ - помеха (шум), приведенная ко входу i-го автономного канала. Из (1), (2) для ошибок $\varepsilon_i(t) = x(t) - y_i(t)$ (i=$\overline{1,N}$) воспроизведения $x(t)$ в

 ISBN 966-593-254-4

установившемся режиме ($t_0 \to -\infty$) получим:

$$\varepsilon_0(t) = x(t),$$

$$\varepsilon_i(t) = \varepsilon_{i-1}(t) - \int_{-\infty}^{t} w_i^*(t-\tau_i)[\varepsilon_{i-1}(\tau_i) + f_i(\tau_i)]d\tau_i =$$

$$= \int_{-\infty}^{t} e_i^*(t-\tau_i)\varepsilon_{i-1}(\tau_i)d\tau_i - \int_{-\infty}^{t} w_i^*(t-\tau_i) f_i(\tau_i)d\tau_i$$

$$\forall i = \overline{1,N}. \quad (3)$$

В частности, при $i=N$ *ошибка N-канальной системы*

$$\varepsilon(t) \equiv \varepsilon_N(t) = x(t) - y_N(t) = \int_{-\infty}^{t} e_N^*(t-\tau_N)\varepsilon_{N-1}(\tau_N)d\tau_N -$$

$$- \int_{-\infty}^{t} w_N^*(t-\tau_N) f_N(\tau_N)d\tau_N, \quad (4)$$

где $e_i^*(t-\tau_i) = \delta(t-\tau_i) - w_i^*(t-\tau_i)$ ($i=\overline{1,N}$) – функция веса ошибки i-го автономного канала, $\delta(t)$ – δ-функция Дирака.

Динамику многомерных, в том числе итерационных многоканальных, систем удобно описывать в векторно-матричной форме, используя операторные представления. На основании соотношений связи (1) – (4) получим следующие операторные уравнения, описывающие динамику неравноточной итерационной N-канальной системы:

$$\vec{y}(t) = M(p)\vec{x}(t), \quad (5)$$

$$\vec{\varepsilon}(t) = \vec{\varepsilon}_x(t) + \vec{\varepsilon}_f(t) = E(p)x(t) - M_f(p)\vec{f}(t),$$

$$p \overset{\Delta}{=} d/dt, \quad (6)$$

где

$$M = M_f = \begin{bmatrix} W_1^* & 0 & 0 & \dots & 0 \\ W_1^*E_2^* & W_2^* & 0 & \dots & 0 \\ W_1^*E_2^*E_3^* & W_2^*E_3^* & W_3^* & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_1^*\prod_{\mu=2}^{N}E_\mu^* & W_2^*\prod_{\mu=3}^{N}E_\mu^* & W_3^*\prod_{\mu=4}^{N}E_\mu^* & \dots & W_N^* \end{bmatrix};$$

$$E = \begin{bmatrix} E_1^* \\ E_1^*E_2^* \\ E_1^*E_2^*E_3^* \\ \dots \\ \dots \\ \prod_{\mu=1}^{N}E_\mu^* \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Здесь $p \overset{\Delta}{=} d/dt$ – оператор дифференцирования по времени; $M \equiv M(p)$ –операторная матрица, преобразующая в общем случае вектор входа системы $\vec{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), ..., x_N(t)]^T$ с элементами $x_i(t) = \varepsilon_{i-1}(t) + f_i(t)$ $\forall i = \overline{1,N}$ в вектор выхода $\vec{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), ..., y_N(t)]^T$ и определяемая на основании (1), (2); $E \equiv E(p)$ и $M_f \equiv M_f(p)$ – операторные матрицы, преобразующие соответственно сам полезный сигнал $x(t)$ и вектор помех $\vec{f}(t) = [f_1(t), f_2(t), ..., f_N(t)]^T$ в векторы ошибок многоканальной системы:

$$\vec{\varepsilon}_x(t) = [\varepsilon_{1x}(t), \varepsilon_{2x}(t), ..., \varepsilon_{Nx}(t)]^T$$

и

$$\vec{\varepsilon}_f(t) = [\varepsilon_{1,f_1}(t), \varepsilon_{2,f_1,f_2}(t), ..., \varepsilon_{N,f_1,f_2,...,f_N}(t)]^T,$$

и определяемые на основании (3), (4). В матрицах (7) обозначено: $W_i^* \equiv W_i^*(p)$ ($i = \overline{1,N}$) – линейные дифференциальные операторы отдельных каналов, соответствующие функциям $w_i^*(t)$; $E_\mu^* \equiv E_\mu^*(p) = 1 - W_\mu^*(p)$ ($\mu = \overline{1,N}$) - операторы ошибок отдельных каналов, соответствующие $e_\mu^*(t)$.

Полученным операторным матрицам $M(p)$ и $E(p)$ удовлетворяют соответствующие им структуры неравноточных итерационных САУ [2,7,9]. Вариант структурной схемы неравноточной итерационной N-канальной воспроизводящей системы, предназначенной для измерения полезного сигнала, показан на рис.1, где $R_i^* \equiv R_i^*(\partial)$ ($i = \overline{1,N}$) – операторы отдельных разомкнутых каналов.

Из формул (3) - (7) и рис.1 видно, что в неравноточных итерационных многоканальных системах, в отличие от *равноточных* [7], ошибки $\varepsilon_i(t)$ уменьшаются с ростом номера i=1,2,…,N канала воспроизведения. При этом точность воспроизведения задающего воздействия $x(t)$ N-канальной ($N \geq 2$) системой может быть существенно повышена по сравнению с одноканальной (N=1) за счет подключения дополнительных уточняющих каналов.

2 ФОРМИРУЮЩИЕ ПАРАМЕТРЫ КАНАЛОВ

Преимущественное применение в промышленных автоматизированных электромеханических системах получили системы управления унифицированными электроприводами с эталонной (или типовой) настройкой контуров управления и с возможностью перенастройки основных параметров регуляторов. Для синтеза таких систем используют метод *эталонных операторов* (ЭО), развитый применительно к итерационным многоканальным САУ в работах [2,5,10]. Согласно этому методу динамика процессов в каждом автономном канале многоканальной системы определяется некоторым выбранным эталонным оператором $W_{\acute{y}i}(\partial)$ ($i = \overline{1,N}$). При этом реальные операторы каналов $W_i^*(\partial)$, соответствующие $w_i^*(t)$, представляются в виде:

$$W_i^*(p) = W_{\acute{y}i}(r_i p) \quad \forall i = \overline{1,N}, \quad (8)$$

где r_i - *формирующий параметр* (масштабный множитель), имеющий размерность времени; в этом случае $\Omega_i = r_i^{-1}$ характеризует полосу пропускания соответствующего i-го канала с эталонной настройкой;

$$W_{ýi}(p) = \frac{D_{ýi}(p)}{C_{ýi}(p)} = \frac{d_{i,m_i} p^{m_i} + d_{i,m_i-1} p^{m_i-1} + \ldots + d_{i1} p + d_{i0}}{c_{i,n_i} p^{n_i} + c_{i,n_i-1} p^{n_i-1} + \ldots + c_{i1} p + c_{i0}}$$

$$m_i \le n_i - 1 \quad \forall i = \overline{1,N} \tag{9}$$

- заданные (или синтезированные) эталонные операторы, соответствующие принятым типовым настройкам каналов.

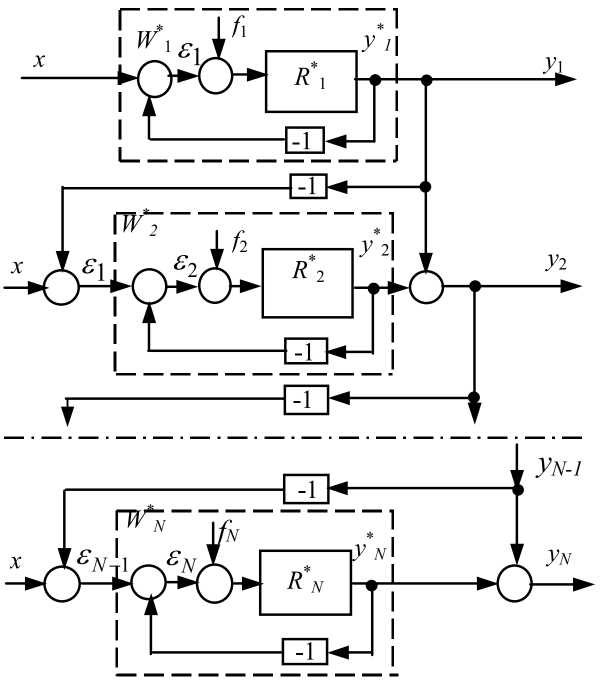

Рис.1. Вариант структурной схемы итерационной N- канальной воспроизводящей системы.

Из (8), (9) следует, что с физической точки зрения каждый формирующий параметр r_i ($i = \overline{1,N}$) определяет реальную полосу пропускания $\Omega_{\Pi i}$ соответствующего i–го канала с эталонной настройкой, не меняя при этом характера динамики заданных (эталонных) характеристик, в частности, частотной характеристики канала $W_{ýi}(\omega)$, где $\omega = 2\pi\Omega$ - угловая частота (скорость), *рад/с*. Поэтому, не нарушая общности, примем: $r_i^{-1} \equiv \Omega_i = \Omega_{\Pi i} \quad \forall i = \overline{1,N}$.

Учитывая, что воспроизводящие системы обладают астатизмом, как правило, не ниже первого порядка, то есть в формуле (9) $c_{i0} = d_{i0} \quad \forall i = \overline{1,N}$, для операторов ошибок каналов многоканальной воспроизводящей системы с учетом (8), (9) можно записать

$$E_{ýi}(p) = 1 - W_{ýi}(p) = \frac{ð^{\nu^*_{ýi}}}{k^*_{ýi}} E^*_{ýi}(p)\,, \quad E^*_{ýi}(0) = 1\,;$$

$$E^*_i(p) = E_{ýi}(r_i p) = \frac{r_i^{\nu^*_{ýi}}}{k^*_{ýi}} p^{\nu^*_{ýi}} Å^*_{ýi}(r_i p) \quad \forall i = \overline{1,N}\,, \tag{10}$$

где $\nu^*_{ýi} \ge 1$ и $k^*_{ýi}$ - порядок астатизма и коэффициент усиления i–го канала. Из (10) для коэффициента ошибки $k_{\varepsilon x}$, характеризующего величину сигнала ошибки $\varepsilon_x(t)$ N-канальной системы с эталонной настройкой, получим:

$$k_{\varepsilon x} = \frac{\prod_{i=1}^{N} r_i^{\nu^*_{ýi}}}{\prod_{i=1}^{N} k^*_{ýi}}\,. \tag{11}$$

Отсюда видно, что при обращении в нуль любого из масштабных множителей $r_i = 0$ ($i = \overline{1,N}$), что соответствует бесконечной полосе пропускания этого канала, имеет место полная инвариантность итерационной системы по отношению к полезному сигналу $x(t)$.

Значения формирующих параметров r_i ($i = \overline{1,N}$) характеризуют также соотношения между полосами пропускания отдельных каналов. Если оператор первого канала принят в качестве эталонного $W_1^*(p) \equiv W_{ýi}(p)$ (r_1=1), то числа r_2, r_3,…, r_N показывают, во сколько раз полоса пропускания k-го ($k = \overline{2,N}$) канала Ω_k шире (если $r_k < 1$) полосы пропускания первого Ω_1. Как видно из (11), с увеличением полосы пропускания (r_k<1) уменьшается значение коэффициента ошибки $k_{\varepsilon õ}$ и увеличивается компенсирующее действие k-го (k=$\overline{2,N}$) канала по сигналу ошибки $\varepsilon_{õ}(t)$.

В качестве *эталонной системы*, получившей широкое применение при синтезе воспроизводящих САУ, примем фильтр Боттерворта n-го порядка [2], для которого с учетом (9)

$$W_ý(p) = \frac{D_ý(p)}{Ñ_ý(p)} = \frac{1}{Ñ_ý(p)}\,, \tag{12}$$

где характеристический полином $C_ý(p)$ в зависимости от порядка n ($n \le 3$) имеет вид:

$$C_ý(p) = T_ý p + 1, \tag{13}$$

$$C_ý(ð) = T_ý^2 p^2 + 1{,}41Ò_ý p + 1\,, \tag{14}$$

$$Ñ_ý(ð) = T_ý^3 p^3 + 2Ò_ý^2 p^2 + 2Ò_ý p + 1\,.$$

Фильтр Боттерворта, как известно, имеет частотные характеристики компактно расположенные относительно частоты $\Omega_ý = T_ý^{-1}$ и является приближением к идеальному ФНЧ.

Таким образом, динамика i-го канала, описываемая заданным эталонным оператором (9), соответствует принятой типовой настройке канала и зависит от одного формирующего параметра r_i, определяющего полосу пропускания этого канала. При этом метод ЭО позволяет определить влияние каждого из каналов с заданной эталонной настройкой $W_{ýi}(ð)$ (i=$\overline{1,N}$) на динамические свойства N-канальной системы с помощью минимального числа формирующих параметров $r_1, r_2, \ldots, r_N$, равного числу каналов. В результате сложная задача синтеза оптимальных операторов N-канальной итерационной системы сводится к более простой задаче параметрической оптимизации в области формирующих параметров. Вопросы анализа и синтеза собственно итерационных многоканальных систем, в том числе с эталонной настройкой каналов, рассмотрены, в частности, в работах [5,6,10,11].

3 ОШИБКИ И СТРУКТУРЫ НЕРАВНОТОЧНОЙ ИТЕРАЦИОННОЙ ДВУХКАНАЛЬНОЙ (*N*=2) ВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ

Из-за относительно высокой стоимости технической реализации, производства и эксплуатации реальных многоканальных систем, построенных по итерационному принципу, преимущественное применение для повышения точности воспроизведения законов управления получили, прежде всего, двухканальные (*N*=2) итерационные системы с эталонной настройкой [4,8,9,12,13]. Соотношения (3) - (9) позволяют исследовать влияние динамических характеристик каждого из каналов на динамические свойства двухканальной системы.

Ошибку воспроизведения $x(t)$ неравноточной итерационной двухканальной системой получим из формул (6), (7) при *N*=2:

$$\varepsilon(t) \equiv \varepsilon_2(t) = \varepsilon_x(t) + \varepsilon_f(t) + \varepsilon_\varphi(t) = E_1^*(p)\,E_2^*(p)\,x(t) -$$

$$- W_1^*(p) E_2^*(p) f(t) - W_2^*(p)\varphi(t), \qquad (15)$$

где

$$\varepsilon_x(t) \equiv \varepsilon_{2x}(t) = E_1^*(p)\,E_2^*(p)\,x(t), \qquad (16)$$

$$\varepsilon_f(t) \equiv \varepsilon_{2,f1}(t) = -W_1^*(p) E_2^*(p) f(t), \qquad (17)$$

$$\varepsilon_\varphi(t) \equiv \varepsilon_{2,f2}(t) = -W_2^*(p)\varphi(t) \qquad (18)$$

- составляющие установившегося значения ошибки системы соответственно по задающему воздействию $x(t)$ и от действия помех $f(t) = f_1(t)$ на первый и $\varphi(t) = f_2(t)$ на второй каналы.

Ошибку одноканальной (*грубой*) системы найдем, полагая в (15) $W_2^*(p) = 0$; $E_2^*(p) = 1 - W_2^*(p) = 1$:

$$\delta(t) \equiv \varepsilon_1(t) = \delta_x(t) + \delta_f(t) =$$

$$= E_1^*(p) x(t) - W_1^*(p) f(t), \qquad (19)$$

где

$$\delta_x(t) \equiv \varepsilon_{1x}(t) = E_1^*(p) x(t), \qquad (20)$$

$$\delta_f(t) \equiv \varepsilon_{1,f1}(t) = -W_1^*(p) f(t) \qquad (21)$$

- составляющие установившегося значения ошибки первого, *грубого* канала двухканальной системы соответственно по задающему воздействию $x(t)$ и помехе $f(t)$.

Тогда вместо (15) для двухканальной системы получим

$$\varepsilon(t) = E_2^*(p)\delta(t) - W_2^*(p)\varphi(t),$$

откуда с учетом (16) – (18) видно, что при $W_2^*(p) \approx 1$, то есть при достаточно широкополосном втором, *точном* канале:

$$\varepsilon_x \approx \varepsilon_f \approx 0,\ \varepsilon(t) \to -\varphi(t).$$

Из приведенных соотношений следует, что в неравноточной итерационной двухканальной системе на выходе второго, точного канала имеет место одновременная компенсация ошибок, обусловленных как задающим воздействием $x(t)$, так и помехой $f(t)$, приложенной к первому, грубому каналу. Помеха $\varphi(t)$, приложенная ко второму каналу, не компенсируется. В этом смысле каналы не равноценны.

В *подклассе* итерационных двухканальных систем [2-4,6,8,9] первый, грубый канал W_1^* (см. рис.1 при *N*=2) несет на себе основную силовую нагрузку в реализации задачи воспроизведения $x(t)$ ($y_1^* \approx x$) и обладает необходимым усилением по мощности. Второй, точный канал W_2^* – маломощный, но имеет, как правило, значительно более широкую полосу пропускания Ω_2 ($\Omega_2 > \Omega_1$) и относительно невысокий уровень помех $\varphi(t)$. Задача второго канала – компенсация сигнала ошибки $\delta(t)$ (19) воспроизведения $x(t)$ первым, грубым каналом W_1^*, для чего он должен иметь высококачественное (например, цифровое) измерительное устройство. С учетом этого первый канал принято также называть *основным*, а второй – *компенсирующим*.

В итерационных двухканальных измерительных системах выходная величина $y(t)$ формируется по разомкнутому циклу, что предъявляет высокие требования к точности суммирования $y_1^*(t)$ и $y_2^*(t)$. Структуры итерационных измерительных систем, рассмотренные в работах [6,10,11] и на рис.1, неприменимы, если выход системы связан с силовой нагрузкой.

Варианты структурных схем итерационных двухканальных воспроизводящих систем с контролем выходной величины $y_2(t) \equiv y(t)$ по замкнутому циклу показаны на рис.2,*а,б*, где $R_i^* \equiv R_i^*(p)$ (*i*=1,2) - операторы отдельных разомкнутых каналов. Эти структуры также реализуют неравноточный итерационный алгоритм воспроизведения (1) - (7) при ***N***=2 . Однако, в отличие от структуры на рис. 1, структуры на рис.2 соответствуют итерационным системам, выход которых связан с инерционной (силовой) нагрузкой.

Выводы. 1. Показано, что при $w_i^*(t) \to \delta(t)$ на *i*-ом выходе итерационной многоканальной системы эквивалентный полезный сигнал воспроизводится практически без искажений, то есть достигается компенсация не только динамических ошибок воспроизведения задающего воздействия $x(t)$, но и ошибок от воздействия помех $f_1(t)$, $f_2(t)$,…, $f_{i-1}(t)$ на предшествующие каналы. Наличие помехи $f_N(t) \neq 0$ в последнем уточняющем канале (*i*=*N*) ограничивает достижение максимально высокой точности воспроизведения с помощью неравноточных итерационных систем, так как ошибка, обусловленная $f_N(t)$, остается нескомпенсированной. Вместе с тем, интенсивность помехи $f_N(t)$, как правило, весьма незначительна.

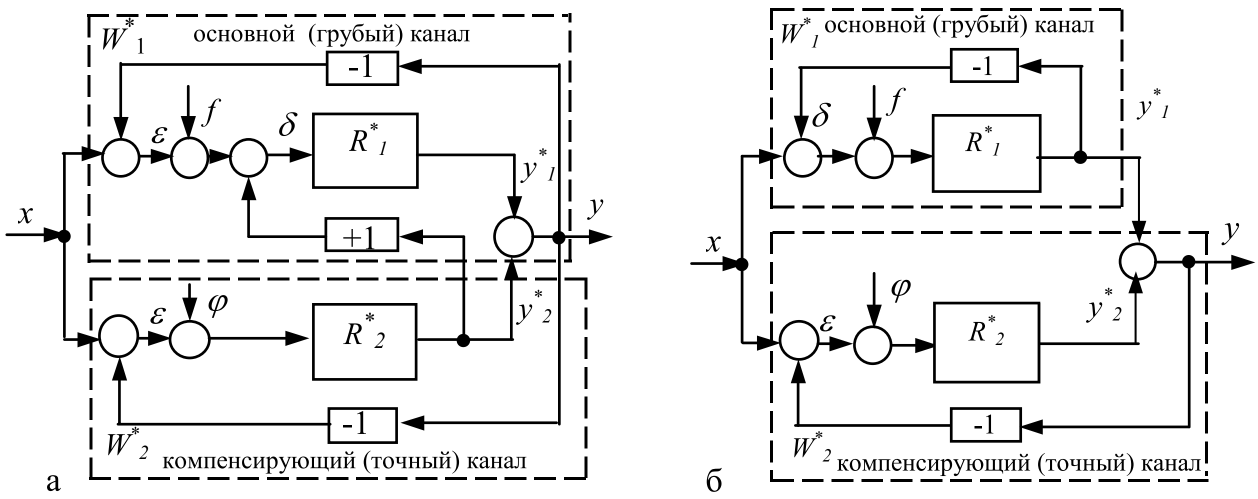

Рис. 2. Варианты структурных схем итерационных двухканальных воспроизводящих систем с контролем выходной величины по замкнутому циклу.

2. Получена удобная векторно-матричная форма (5) - (7) формального описания неравноточного итерационного алгоритма функционирования многоканальных САУ при наличии помех. Показаны преимущества метода ЭО применительно к задаче синтеза итерационных многоканальных систем.

3. Рассмотрены выражения для ошибок и варианты структурной схемы неравноточной итерационной двухканальной (N=2) воспроизводящей системы с контролем выходной величины $y(t)$ по замкнутому циклу и при наличии помех $f(t) = f_1(t)$ и $\varphi(t) = f_2(t)$, приведенных по входам соответственно первого и второго каналов управления.

Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность эффективного решения проблемы повышения точности воспроизведения полезного сигнала при наличии аддитивных возмущений с помощью неравноточных итерационных многоканальных систем с эталонной настройкой каналов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Клубникин П.Ф. Объединенные следящие системы с двумя приводами // Автоматика и телемеханика. – 1959.– Т.XX. – №2. – С.161-175.

[2] Осмоловский П.Ф. Итерационные многоканальные системы автоматического управления. – М.: Сов. радио, 1969. – 256 с.

[3] Следящие приводы. В 2-х кн. / Под ред. Б.К. Чемоданова. Кн. Первая. – М.: Энергия, 1976. – 480 с.

[4] Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.

[5] Худяев А.А. Алгоритм расчета дисперсий ошибок многоканальных итерационных систем методом рекуррентных уравнений // Автоматика. – 1986. – №6. – С. 43 – 52.

[6] Осмоловский П.Ф., Худяев А.А. Влияние запаздывания входных координат на динамическую точность двухканальной итерационной измерительной системы // Автоматика. – 1990. – №2. – С. 35 – 42.

[7] Худяев А.А., Московец В.И. Эффективность итерационных алгоритмов построения следящих систем с неидентичными входными координатами // Автоматизация технологических процессов и производств. – Харьков: ХАИ, 1988. – С. 130 – 143.

[8] Никольский А.А. Новые высокоточные электроприводы с пьезокомпенсаторами для станков, механизмов и приборов // Электротехника. – 1993. – №1. – С. 27 – 31.

[9] Многоканальные итерационные системы управления: Учебное пособие / Б.И. Кузнецов, А.А. Худяев, И.Н. Богаенко и др. – К.: НПК "КИА", 1998. – 224 с.

[10] Худяев А.А., Гвоздева Е.В. Автоматизированное проектирование итерационных многоканальных систем с эталонной настройкой каналов // Вестник ХГПУ. Сборник научных трудов. Тематический выпуск 113. – Харьков: ХГПУ, 2000. – С. 49 – 56.

[11] Худяев А.А. Оптимальные структуры каналов управления и оценка точности в классе итерационных многоканальных воспроизводящих систем // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник ХГПУ. Спец. выпуск. – Харьков: ХГПУ, 1998. – С. 52 – 54.

[12] Двухякорный линейный синхронный привод обрабатывающего центра / Б.И. Кузнецов, А.А. Худяев, И.М. Некрасов, В.И. Русаев // Электротехника. – 1993. – №4. – С. 11 – 18.

[13] Худяев А.А. Многоканальный прецизионный линейный электропривод для станков инструментального производства // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник ХГПУ. Спец. выпуск. – Харьков: ХГПУ, 1998. - С. 279 – 280.

Поступила 09.06.2003