

А.А. ХУДЯЕВ, канд. техн. наук, доцент, НТУ "ХПИ", Харьков
А.И. МИШЕНЮК, магистрант, НТУ "ХПИ", Харьков

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИТЕРАЦИОННЫХ ТРЕХКАНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ВХОДНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Побудована математична модель і одержана порівняльна імовірнісна оцінка точності ітераційної триканальної слідкуючої системи керування з урахуванням адитивних випадкових завад та відмінного еталонного настроювання динаміки автономних каналів керування електроприводами.

Получена математическая модель и выполнена сравнительная вероятностная оценка точности итерационной трехканальной следящей системы управления с учетом аддитивных случайных помех и различной эталонной настройки динамики автономных каналов управления электроприводами.

Введение. В настоящее время существует необходимость в разработке электромеханических следящих систем управления повышенной точности, работающих при случайных входных воздействиях. Имеется, например, потребность в высокоточных системах наведения и управления инерционными механизмами и объектами специального назначения для судов, самолетов и бронемашин, работающих в быстроизменяющихся условиях и при наличии различного рода труднокомпенсируемых случайных помех. В частности, такие системы необходимы для управления электроприводами (ЭП) гироскопов, рулевых, орудийных и антенных установок, прецизионных контрольно-измерительных приборов и других динамичных объектов точного управления.

В этих условиях для повышения динамической точности воспроизведения задающего воздействия целесообразно применять различные многоканальные электромеханические системы, работающие по принципу "грубого" и "точного" управления и объединенные в классе итерационных многоканальных систем автоматического управления (САУ) [1]. Итерационные многоканальные следящие системы представляют один из подклассов таких систем, в которых каждый последующий более точный канал работает по результирующей ошибке воспроизведения полезного сигнала предшествующими грубыми каналами, что позволяет, как правило, получать точность слежения, недос-

тижимую в одноканальных системах управления.

Итерационный принцип построения САУ, позволяющий существенно повысить точность управления, достаточно хорошо известен в теории и практике автоматического управления и автоматизированных электромеханических следящих систем [1-3].

Цель работы – теоретические исследования прикладных вопросов, связанных с автоматизацией проектирования итерационных трехканальных, следящих систем.

Постановка задачи. В классе итерационных многоканальных САУ воспроизведение задающих воздействий осуществляется последовательными приближениями (итерациями), реализуемыми соответствующими каналами. Это позволяет, как показано в работах [3,6-8], уже в случае итерационных двухканальных систем получать точность воспроизведения полезного сигнала $x(t)$, недостижимую в одноканальных системах. Однако, при этом окончательно не решены вопросы оценки эффективности итерационных N -канальных, в том числе трехканальных, следящих систем, работающих при наличии интенсивных аддитивных случайных помех $f_i(t)$ ($i = \overline{1, N}$) в контуре и объекте управления, алгоритмизации основных методов анализа и синтеза, а также формализации общего математического описания, удобного для компьютерного моделирования и проектирования таких систем.

Вариант структурной схемы итерационной N -канальной электромеханической следящей системы управления показан на рис.1, где обозначено: R_i^* ($i = \overline{1, N}$) – оператор i -го автономного разомкнутого канала управления $K-i$, включающего исполнительный двигатель и редуктор соответствующего ЭП; f_i ($i = \overline{1, N}$) – помеха, приведенная ко входу i -го канала; y_i ($i = \overline{1, N}$) – выходная координата i -канальной системы; ϵ_i ($i = \overline{1, N}$) – ошибка воспроизведения $x(t)$ i -канальной системой.

Для расчета дисперсий ошибок и анализа устойчивости итерационных многоканальных следящих систем при случайных входных воздействиях воспользуемся удобным методом рекуррентных уравнений К. Острема [4], представленным в виде обобщенного алгоритма в работе [5]. Кроме того, применительно к задачам параметрической оптимизации итерационных систем с типовой настройкой автономных ЭП целесообразно использовать метод формирующих параметров (ФП) каналов управления (или метод эталонных операторов), рассмотренный в работах [5, 7, 8].

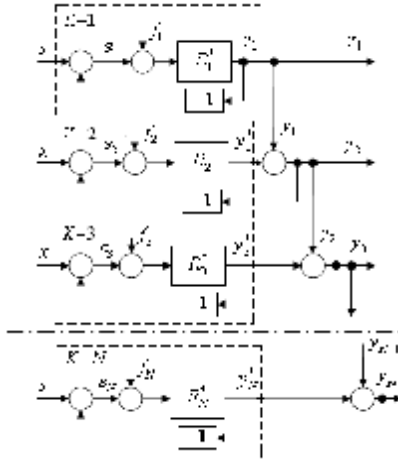


Рис. 1.

В этом случае линейные дифференциальные операторы автономных замкнутых каналов $W_i(p)$, $p = d/dt$, соответствующие функциям веса $w_i(t)$, представляются в виде:

$$W_i(p) = W_{\Omega_i}(r_i p), \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где r_i – безразмерный формирующий параметр (масштабный множитель) i -го канала, при этом $\Omega_i = r_i^{-1}$ характеризует величину полосы пропускания i -го канала;

$$W_{\Omega_i}(p) = \frac{D_{\Omega_i}(p)}{C_{\Omega_i}(p)} = \frac{d_0 + d_1 p + d_2 p^2 + \dots + d_{m-1} p^{m-1}}{c_0 + c_1 p + c_2 p^2 + \dots + c_m p^m}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

– заданные эталонные операторы каналов управления ЭП.

Метод ФП позволяет определить влияние каждого из каналов на динамические свойства N -канальной системы с помощью минимального числа формирующих параметров r_1, r_2, \dots, r_N , равного числу каналов. В результате сложная задача синтеза оптимальных операторов каналов сводится к более простой задаче параметрической оптимизации в области формирующих параметров.

В настоящей работе получим математическую модель и выполним вероятностную оценку точности итерационной трехканальной

($N=3$) электромеханической следящей системы управления с учетом аддитивных случайных помех и различной эталонной настройки динамики автономных каналов управления ЭП.

Математическая модель итерационной трехканальной следящей системы при случайных воздействиях. Пусть входные воздействия $x(t)$ и $f(t)$ ($i = \overline{1, N}$) следящей системы представляют собой центрированные стационарные случайные процессы, которые могут быть сформированы из соответствующих некоррелированных между собой стационарных случайных процессов $x_{\delta}(t)$ и $f_{\delta}(t)$ типа белого шума единичной интенсивности с помощью заданных формирующих фильтров (ФФ) с рациональными линейными операторами $V_x(\delta)$ и $V_{f_i}(\delta)$:

$$x(t) = V_x(p)x_{\delta}(t), \quad f_i(t) = V_{f_i}(p)f_{\delta_i}(t) \quad \forall i = \overline{1, N}.$$

Тогда в области частотных изображений найдем

$$V_x(s) = F\{V_x(p)\}, \quad V_{f_i}(s) = F\{V_{f_i}(p)\} \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (3)$$

где $F\{\cdot\}$ – операция преобразования Фурье; $s=j\omega$, $j = \sqrt{-1}$; $\omega = 2\pi\Omega$ – угловая частота (скорость), рад/с.

Для радиолокационных следящих систем в качестве типовых операторов ФФ с учетом (3) можно принять [5]:

$$V_x(s) = \sqrt{S_{\mathcal{X}}(0)} [s(T_{\mathcal{X}}s + 1)]^{-1}, \quad V_{f_i}(s) = \sqrt{S_{f_i}(0)} [s(T_{f_i}s + 1)]^{-1} \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где $S_{\mathcal{X}}(0)$, $S_{f_i}(0)$ и $T_{\mathcal{X}}$, T_{f_i} – начальные (при $\omega=0$) значения спектральных плотностей и постоянные времени корреляции случайных процессов $\mathcal{X}(t)$, $f_i(t)$; $\mathcal{X}(t)$ – стационарный случайный процесс, соответствующий первой производной изменения полезного сигнала.

Отметим, что в случае детерминированного полезного сигнала оператор $V_x(s)$ представляет собой преобразование Фурье заданной функции $x(t)$.

Для оценки точности следящих систем при случайных внешних воздействиях наиболее просто определить среднеквадратическую ошибку. Тогда из (1), (2) и (4) для установившегося значения дисперсии ошибки ε_N^2 итерационной N -канальной системы получим:

$$\begin{aligned}
Q &= \overline{\varepsilon_N^2} = M\{[x(t) - y_N(t)]^2\} = \overline{\varepsilon_{Nx}^2} + \sum_{i=1}^N \overline{\varepsilon_{Nf_i}^2} = \\
&= \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \prod_{i=1}^N E_{\vartheta_i}(r_i s) E_{\vartheta_i}(-r_i s) V_x(s) V_x(-s) ds + \\
&+ \frac{1}{2\pi j} \sum_{i=1}^N \int_{-j\infty}^{+j\infty} W_{\vartheta_i}(r_i s) W_{\vartheta_i}(-r_i s) \prod_{k=i+1}^N E_{\vartheta_k}(r_k s) E_{\vartheta_k}(-r_k s) V_{f_i}(s) V_{f_i}(-s) ds, \quad (5)
\end{aligned}$$

где M – символ операции математического ожидания; $\overline{\varepsilon_{Nx}^2}$ и $\overline{\varepsilon_{Nf_i}^2}$ – составляющие дисперсии ошибки N -канальной системы, обусловленные сигналами $x(t)$ и $f_i(t)$ соответственно; $E_{\vartheta_i}(s) = 1 - W_{\vartheta_i}(s)$ – эталонный оператор (передаточная функция) ошибки i -го автономного канала; $W_{\vartheta_i}(s)$ – частотное изображение оператора $W_{\vartheta_i}(p)$; $V_x(s)V_x(-s) = S_x(\omega)$ и $V_{f_i}(s)V_{f_i}(-s) = S_{f_i}(\omega)$ – рациональные спектральные плотности случайных процессов $x(t)$ и $f_i(t)$.

Структуру эталонного оператора (2) первого (основного) канала следящей системы зададим оператором 3-го порядка, получившим широкое применение при проектировании следящих ЭП:

$$W_{\vartheta_1}(p) = W_{\vartheta}(p) = \frac{D_{\vartheta}(p)}{C_{\vartheta}(p)} = \frac{d_{\vartheta 2} p^2 + d_{\vartheta 1} p + 1}{c_{\vartheta 3} p^3 + c_{\vartheta 2} p^2 + c_{\vartheta 1} p + 1}. \quad (6)$$

Одним из значительных достижений в прикладной линейной теории управления является предложенный К. Остремом эффективный рекуррентный метод расчета устойчивости и дисперсии ошибки (так называемой функции потерь) на выходе динамической САУ по коэффициентам соответствующей передаточной функции, описанный в работе [2].

Выражение для дисперсии $\overline{\varepsilon_N^2}$ можно преобразовать к интегралу вида

$$I = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \frac{B(s)B(-s)}{A(s)A(-s)} ds, \quad (7)$$

где $A(s)$ и $B(s)$ – полиномы с рациональными коэффициентами, определяющими динамические характеристики автономных каналов и физические параметры входных воздействий:

$$A(s) = a_0 s^m + a_1 s^{m-1} + a_2 s^{m-2} + \dots + a_{m-1} s + a_m,$$

$$B(s) = b_1 s^{m-1} + b_2 s^{m-2} + \dots + b_{m-1} s + b_m.$$

Если полином $A(s)$ не имеет нулей на мнимой оси, то интеграл (7) существует, т.е. существование I связано с устойчивостью итерационной системы.

В результате интеграл I (дисперсия ошибки) (7) вычисляется по формуле [2]:

$$I = \sum_{k=1}^m \beta_k^2 / (2\alpha_k) = \sum_{k=1}^m (b_1^k)^2 / (2a_0^k a_1^k), \quad (8)$$

где коэффициенты b_1^k, a_0^k, a_1^k удобно определять по алгоритму, рассмотренному в работе [5]. Уточненная схема алгоритма расчета дисперсий ошибок и оценки устойчивости итерационных многоканальных САУ методом рекуррентных уравнений К. Острема, приведена на рис. 2.

Для оценки эффективности итерационных систем по величине $\overline{\epsilon_N^2}$ рассмотрим итерационную трехканальную ($N = 3$) следящую систему с заданными операторами каналов. В этом случае для обозначения автономных каналов управления системы примем: первый, грубый канал – $K-1$; второй, компенсирующий канал – $K-2$; третий, точный канал – $K-3$. При этом главной функцией канала $K-2$ является компенсация ошибок грубого канала $K-1$, а точного канала $K-3$ – компенсация ошибок итерационной двухканальной системы, что обусловит возможность повышения точности воспроизведения задания всей трехканальной системой.

Для синтеза параметров эталонного оператора канала управления в качестве минимизируемого функционала примем дисперсию ошибки первого, грубого канала итерационной следящей системы, для которой из (5) при $N=1, r_i = r_1 = 1$ и с учетом (6) при найдем:

$$Q_1 = \overline{\epsilon_{\partial 1}^2} = \overline{\delta_{\partial}^2} = \overline{\delta_{\partial x}^2} + \overline{\delta_{\partial f_1}^2} = Q_1(d_{\partial 1}, d_{\partial 2}, c_{\partial 1}, c_{\partial 2}, c_{\partial 3}) \rightarrow \min_{d_{\partial 1}, d_{\partial 2}, c_{\partial 1}, c_{\partial 2}, c_{\partial 3}}, \quad (9)$$

где $\overline{\delta_{\partial x}^2}$ и $\overline{\delta_{\partial f_1}^2}$ – дисперсии ошибок первого канала, обусловленные полезным сигналом $x(t)$ и помехой $f_1(t)$ соответственно:

$$\begin{aligned} \overline{\delta_{\partial x}^2} &= \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} E_{y1}(s) V_x(s) E_{y1}(-s) V_x(-s) ds; \\ \overline{\delta_{\partial f_1}^2} &= \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} W_{y1}(s) V_{f_1}(s) W_{y1}(-s) V_{f_1}(-s) ds. \end{aligned} \quad (10)$$

Окончательно с учетом (4), (6) дисперсии ошибок $\overline{\delta_{\partial x}^2}$ и $\overline{\delta_{\partial f_1}^2}$ (10) представим в виде (7):

$$\overline{\delta_{y\delta}^2} = S_x(0) \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \frac{B_x^*(s) B_x^*(-s)}{A_x^*(s) A_x^*(-s)} ds = S_x(0) I_{x,1};$$

$$\overline{\delta_{y\dot{f}_1}^2} = S_{f_1}(0) \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \frac{B_{f_1}^*(s) B_{f_1}^*(-s)}{A_{f_1}^*(s) A_{f_1}^*(-s)} ds = S_{f_1}(0) I_{f_1,1}, \quad (11)$$

где

$$A_x^*(s) = C_{\dot{y}}(\eta_1 s)(1 + T_{\mathbb{R}} s) = T_{\mathbb{R}} c_{y3} r_1^3 s^4 + r_1^2 (T_{\mathbb{R}} c_{y2} + \tilde{n}_{y3} r_1) s^3 +$$

$$+ r_1 (T_{\mathbb{R}} c_{y1} + \tilde{n}_{y2} r_1) s^2 + (T_{\mathbb{R}} + c_{y1} r_1) s + 1;$$

$$B_x^*(s) = [C_{\dot{y}}(\eta_1 s) - D_{\dot{y}}(\eta_1 s)]/s = c_{y3} r_1^3 s^2 + r_1^2 (c_{y2} - d_{y2}) s + r_1 (c_{y1} - d_{y1});$$

$$A_{f_1}^*(s) = C_{\dot{y}}(\eta_1 s)(1 + T_{f_1} s) = T_{f_1} c_{y3} r_1^3 s^4 + r_1^2 (T_{f_1} c_{y2} + c_{y3} r_1) s^3 +$$

$$+ r_1 (T_{f_1} c_{y1} + c_{y2} r_1) s^2 + (T_{f_1} + c_{y1} r_1) s + 1;$$

$$B_{f_1}^*(s) = D_{\dot{y}}(\eta_1 s) = d_{y2} r_1^2 s^2 + d_{y1} r_1 s + 1. \quad (12)$$

При синтезе эталонного оператора в (12) принимают $r_1 = 1$.

Из (5) при $N=2$ для дисперсии ошибки $\overline{\varepsilon^2} = \overline{\varepsilon_2^2}$ двухканальной ($N = 2$) системы с заданной эталонной или типовой настройкой при наличии помех $f_1(t) = f(t)$ на первый, грубый и $f_2(t) = \varphi(t)$ на второй, компенсирующий каналы получим

$$Q_2 = \overline{\varepsilon_2^2} = \overline{\varepsilon_{x,2}^2} + \overline{\varepsilon_{f_1,2}^2} + \overline{\varepsilon_{f_2,2}^2} = \overline{\varepsilon_{x,2}^2} + \overline{\varepsilon_{f,2}^2} + \overline{\varepsilon_{\varphi,2}^2} = Q_2(r_1, r_2) \rightarrow \min_{r_1, r_2}; \quad (13)$$

$$\overline{\varepsilon_{x,2}^2} = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} E_1(s) E_2(s) V_x(s) E_1(-s) E_2(-s) V_x(-s) ds;$$

$$\overline{\varepsilon_{f,2}^2} = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} W_1(s) E_2(s) V_f(s) W_1(-s) E_2(-s) V_f(-s) ds;$$

$$\overline{\varepsilon_{\varphi,2}^2} = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} W_2(s) V_{\varphi}(s) W_2(-s) V_{\varphi}(-s) ds. \quad (14)$$

Здесь: $W_i(s) = W_{y_i}(r_i s)$ ($i=1,2$) – оператор i -го замкнутого канала; $E_1(s) = 1 - W_{y1}(r_1 s) = \overline{\delta}(s)/x(s)$ и $E_2(s) = 1 - W_{y2}(r_2 s) = \overline{\varepsilon_2}(s)/\overline{\delta}(s)$ – операторы ошибок соответственно первого и второго каналов.

Предполагая для простоты, что в итерационной двухканальной системе выполняется

$$\overline{\varepsilon_{\varphi,2}^2} = S_{\varphi}(0) \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \frac{B_{\varphi}(s)B_{\varphi}(-s)}{A_{\varphi}(s)A_{\varphi}(-s)} ds = S_{\varphi}(0)I_{\varphi,2}; \quad (17)$$

где при $\tilde{n}_{y3} = 1$

$$\begin{aligned} A_x(s) &= C_{y_1}(r_1s)C_{y_2}(r_2s)(T_{\& }s + 1) = T_{\& }r_1^3r_2^3s^7 + r_1^2r_2^2[T_{\& }c_{y_2}(r_1 + r_2) + r_1r_2]s^6 + \\ &+ r_1r_2\{T_{\& }[c_{y_1}(r_1^2 + r_2^2) + c_{y_2}^2r_1r_2] + c_{y_2}r_1r_2(r_1 + r_2)\}s^5 + \\ &+ \{T_{\& }[c_{y_1}c_{y_2}r_1r_2(r_1 + r_2) + r_1^3 + r_2^3] + r_1r_2[c_{y_1}(r_1^2 + r_2^2) + c_{y_2}^2r_1r_2]\}s^4 + \\ &+ \{T_{\& }[c_{y_1}^2r_1r_2 + c_{y_2}(r_1^2 + r_2^2)] + [c_{y_1}c_{y_2}r_1r_2(r_1 + r_2) + r_1^3 + r_2^3]\}s^3 + \\ &+ [T_{\& }c_{y_1}(r_1 + r_2) + c_{y_1}^2r_1r_2 + c_{y_2}(r_1^2 + r_2^2)]s^2 + [T_{\& } + c_{y_1}(r_1 + r_2)]s + 1; \\ B_x(s) &= [C_{y_1}(r_1s) - D_{y_1}(r_1s)][C_{y_2}(r_2s) - D_{y_2}(r_2s)]/s = \\ &= r_1^3r_2^3s^5 + (c_{y_2} - d_{y_2})r_1^2r_2^2(r_1 + r_2)s^4 + \\ &+ r_1r_2[(c_{y_1} - d_{y_1})(r_1^2 + r_2^2) + (c_{y_2} - d_{y_2})^2r_1r_2]s^3 + \\ &+ (c_{y_2} - d_{y_2})(\tilde{n}_{y_1} - d_{y_1})r_1r_2(r_1 + r_2)s^2 + (c_{y_1} - d_{y_1})^2r_1r_2s; \\ A_f(s) &= C_{y_1}(r_1s)C_{y_2}(r_2s)(T_f s + 1) = T_f r_1^3 r_2^3 s^7 + r_1^2 r_2^2 [T_f c_{y_2}(r_1 + r_2) + r_1 r_2] s^6 + \\ &+ r_1 r_2 \{T_f [c_{y_1}(r_1^2 + r_2^2) + c_{y_2}^2 r_1 r_2] + c_{y_2} r_1 r_2 (r_1 + r_2)\} s^5 + \\ &+ \{T_f [c_{y_1} \tilde{n}_{y_2} r_1 r_2 (r_1 + r_2) + r_1^3 + r_2^3] + r_1 r_2 [\tilde{n}_{y_1}(r_1^2 + r_2^2) + \tilde{n}_{y_2}^2 r_1 r_2]\} s^4 + \\ &+ \{T_f [c_{y_1}^2 r_1 r_2 + \tilde{n}_{y_2}(r_1^2 + r_2^2)] + [\tilde{n}_{y_1} c_{y_2} r_1 r_2 (r_1 + r_2) + r_1^3 + r_2^3]\} s^3 + \\ &+ [T_f \tilde{n}_{y_1}(r_1 + r_2) + c_{y_1}^2 r_1 r_2 + \tilde{n}_{y_2}(r_1^2 + r_2^2)] s^2 + [T_f + \tilde{n}_{y_1}(r_1 + r_2)] s + 1; \\ B_f(s) &= D_{y_1}(r_1s)[C_{y_2}(r_2s) - D_{y_2}(r_2s)] = c_{y_3} d_{y_2} r_1^2 r_2^3 s^5 + \\ &+ r_1 r_2 [d_{y_2} r_1 r_2 (c_{y_2} - d_{y_2}) + c_{y_3} d_{y_1} r_2^2] s^4 + \\ &+ r_2 [(d_{y_2} r_1 (c_{y_1} - d_{y_1}) + c_{y_3} d_{y_1} r_2^3) r_1 + c_{y_3} r_2^2] s^3 + \\ &+ r_2 [(d_{y_1} r_1 (c_{y_1} - d_{y_1}) + r_2 (c_{y_2} - d_{y_2}))] s^2 + r_2 (c_{y_1} - d_{y_1}) s; \\ A_{\varphi}(s) &= C_{\varphi}(r_2s)(T_{\varphi} s + 1) = r_2^3 T_{\varphi} s^4 + r_2^2 (T_{\varphi} c_{\varphi 2} + r_2) s^3 + \\ &+ r_2 (c_{\varphi 2} r_2 + c_{\varphi 1} T_{\varphi}) s^2 + (c_{\varphi 1} r_2 + T_{\varphi}) s + 1; \\ B_{\varphi}(s) &= D_{y_1}(r_2s) = d_{y_2} r_2^2 s^2 + d_{y_1} r_2 s + 1. \end{aligned} \quad (18)$$

В случае итерационной трехканальной ($N=3$) системы обозначим: $f_3(t) = \psi(t)$. Критерий качества примет вид:

$$Q_3 = \overline{\varepsilon_3^2} = \overline{\varepsilon_{x,3}^2} + \overline{\varepsilon_{f,3}^2} + \overline{\varepsilon_{\phi,3}^2} + \overline{\varepsilon_{\psi,3}^2} = \overline{\varepsilon_3^2}(r_1, r_2, r_3) \rightarrow \min_{r_1, r_2, r_3}, \quad (19)$$

где $\overline{\varepsilon_{\delta,3}^2}$ и $\overline{\varepsilon_{f,3}^2}, \overline{\varepsilon_{\phi,3}^2}, \overline{\varepsilon_{\psi,3}^2}$ – составляющие установившегося значения дисперсии ошибки трехканальной системы $\overline{\varepsilon_3^2}$ соответственно по полезному сигналу $\delta(t)$ и от действия случайных помех $f(t), \phi(t), \psi(t)$ в каналах. Вариант структурной схемы итерационной трехканальной следящей системы управления с общим датчиком положения и формирующими фильтрами случайных входных воздействий приведен на рис. 3, где обозначено: *PK-1, PK-2* и *PK-3* – грубый, компенсирующий и точный разомкнутые каналы управления; *ГШ_x, ГШ_f, ГШ_φ, ГШ_ψ* – генераторы белого шума.

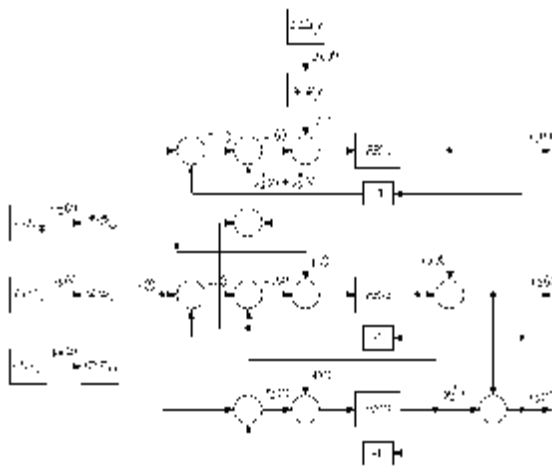


Рис. 3.

Отметим, что свойства итерационных трехканальных следящих систем управления, реализуемых на основе структур на рис. 1 и рис. 3 идентичны.

Из (5) при $N=3$ для определения дисперсий ошибок $\overline{\varepsilon_{x,3}^2}, \overline{\varepsilon_{f,3}^2}, \overline{\varepsilon_{\phi,3}^2}, \overline{\varepsilon_{\psi,3}^2}$ трехканальной ($N=3$) САУ с эталонной или типовой на-

стройкой получим следующие расчетные формулы:

$$\overline{\varepsilon_{x,3}^2} = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} [1 - W_{y,1}(r_1 s)][1 - W_{y,2}(r_2 s)][1 - W_{y,3}(r_3 s)] V_x(s) \times \\ \times [1 - W_{y,1}(-r_1 s)][1 - W_{y,2}(-r_2 s)][1 - W_{y,3}(-r_3 s)] V_x(-s) ds; \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
\overline{\varepsilon_{f,3}^2} &= \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} W_{y,1}(r_1 s) [1 - W_{y,2}(r_2 s)] [1 - W_{y,3}(r_3 s)] V_f(s) \times \\
&\quad \times W_{y,1}(-r_1 s) [1 - W_{y,2}(-r_2 s)] [1 - W_{y,3}(-r_3 s)] V_f(-s) ds ; \\
\overline{\varepsilon_{\varphi,3}^2} &= \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} W_{\varphi,2}(r_2 s) [1 - W_{\varphi,3}(r_3 s)] V_{\varphi}(s) \times \\
&\quad \times W_{\varphi,2}(-r_2 s) [1 - W_{\varphi,3}(-r_3 s)] V_{\varphi}(-s) ds ; \\
\overline{\varepsilon_{\psi,3}^2} &= \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} W_{y,3}(r_3 s) V_{\psi}(s) W_{y,3}(-r_3 s) V_{\psi}(-s) ds , \quad (21)
\end{aligned}$$

где $V_{\psi}(s)$ – частотное изображение оператора ФФ случайной помехи $\psi(t)$;

$$V_{\psi}(s) = \frac{B_{\psi}(s)}{C_{\psi}(s)} = \frac{\sqrt{S_{\psi}(0)}}{T_{\psi}s + 1} ; \quad (22)$$

$S_{\psi}(0)$ и T_{ψ} – начальное (при $\omega = 0$) значение спектральной плотности и постоянная времени корреляции процесса $\psi(t)$.

Тогда, полагая для простоты в итерационной трехканальной системе

$$W_{y,1}(s) = W_{y,2}(s) = W_{y,3}(s) = W_y(s) , \quad (23)$$

окончательно с учетом (4), (6), (22) дисперсии ошибок (20) и (21) представим в виде:

$$\begin{aligned}
\overline{\varepsilon_{x,3}^2} &= S_x(0) \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \frac{B_{x,3}(s) B_{x,3}(-s)}{A_{x,3}(s) A_{x,3}(-s)} ds = S_x(0) I_{x,3} , \quad (24) \\
\overline{\varepsilon_{f,3}^2} &= S_f(0) \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \frac{B_{f,3}(s) B_{f,3}(-s)}{A_{f,3}(s) A_{f,3}(-s)} ds = S_f(0) I_{f,3} , \\
\overline{\varepsilon_{\varphi,3}^2} &= S_{\varphi}(0) \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \frac{B_{\varphi,3}(s) B_{\varphi,3}(-s)}{A_{\varphi,3}(s) A_{\varphi,3}(-s)} ds = S_{\varphi}(0) I_{\varphi,3} ,
\end{aligned}$$

$$\overline{\varepsilon_{\Psi,3}^2} = S_{\Psi}(0) \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \frac{B_{\Psi,3}(s)B_{\Psi,3}(-s)}{A_{\Psi,3}(s)A_{\Psi,3}(-s)} ds = S_{\Psi}(0)I_{\Psi,3}, \quad (25)$$

где подынтегральные полиномы в компактном обобщенном представлении имеют вид

$$\begin{aligned} A_{x,3}(s) &= C_{y,1}(r_1 s)C_{y,2}(r_2 s)C_{y,3}(r_3 s)(T_{\mathbb{R}}s + 1); \\ B_{x,3}(s) &= [C_{y,1}(r_1 s) - D_{y,1}(r_1 s)][C_{y,2}(r_2 s) - D_{y,2}(r_2 s)][C_{y,3}(r_3 s) - D_{y,3}(r_3 s)]/s; \\ A_{f,3}(s) &= C_{y,1}(r_1 s)C_{y,2}(r_2 s)C_{y,3}(r_3 s)(T_f s + 1); \\ B_{f,3}(s) &= D_{y,1}(r_1 s)[C_{y,2}(r_2 s) - D_{y,2}(r_2 s)][C_{y,3}(r_3 s) - D_{y,3}(r_3 s)]; \\ A_{\varphi,3}(s) &= C_{y,2}(r_2 s)C_{y,3}(r_3 s)(T_{\varphi} s + 1); \\ B_{\varphi,3}(s) &= D_{y,2}(r_2 s)[C_{y,3}(r_3 s) - D_{y,3}(r_3 s)]; \\ A_{\Psi,3}(s) &= C_{y,3}(r_3 s)(T_{\Psi} s + 1); \\ B_{\Psi,3}(s) &= D_{y,3}(r_3 s). \end{aligned} \quad (26)$$

В развернутом виде полиномы (26) реализованы программно в пакете компьютерного моделирования "Matlab".

Из (20)-(22) видно, что изменение интенсивности помехи $\psi(t)$ на третий, точный канал K -3 оказывает наибольшее влияние на величину дисперсии ошибки $\overline{\varepsilon_3^2}$ (19), так как в процессе работы итерационной трехканальной системы эта помеха остается нескомпенсированной. Обычно уровень $S_{\varphi}(0)$ помехи $\varphi(t)$ во втором, компенсирующем канале K -2 значительно (на порядок и более) ниже, чем уровень $S_f(0)$ помехи $f(t)$ в грубом канале K -1, а уровень $S_{\Psi}(0)$ помехи $\psi(t)$ в третьем, точном канале K -3 на два порядка (и более) ниже, чем в K -1. Это позволяет эффективно использовать итерационные следящие системы для повышения точности управления при наличии случайных помех в каналах. С учетом этого положим:

$$S_{\varphi}(0) = \lambda S_f(0), \quad \lambda = \text{var};$$

$$S_{\Psi}(0) = \rho S_f(0), \quad \rho = \text{var}. \quad (27)$$

Для оценки эффективности итерационной двухканальной следящей системы с эталонной настройкой введем суммарный выигрыш в точности G_{21} , равный отношению установившихся значений дисперсий ошибок основного (первого) канала $\overline{\delta^2} = \overline{\delta_{\delta}^2}$ при $r_1 = 1$ и двухканальной системы $\overline{\varepsilon_2^2} = \overline{\varepsilon_2^2}(r_2)$ при различных λ . Из (13) для G_{21} получим:

$$G_{21} = \frac{\overline{\delta^2}}{\overline{\varepsilon_2^2}} = \frac{\overline{\delta_{y\delta}^2} + \overline{\delta_{yf_1}^2}}{\overline{\varepsilon_{x,2}^2}(r_2) + \overline{\varepsilon_{f,2}^2}(r_2) + \overline{\varepsilon_{\varphi,2}^2}(r_2)} = G_{21}(r_2). \quad (28)$$

Введем также показатели (выигрыши в точности)

$$g_{x,21} = \frac{\overline{\delta_{yx}^2}}{\overline{\varepsilon_{x,2}^2}(r_2)} = g_{x,21}(r_2), \quad g_{f,21} = \frac{\overline{\delta_{yf_1}^2}}{\overline{\varepsilon_{f,2}^2}(r_2)} = g_{f,21}(r_2),$$

характеризующие эффективность использования второго, компенсирующего (уточняющего) канала для компенсации ошибок по полезному сигналу $x(t)$ и помехе $f(t)$ соответственно.

Из (9), (13) и (19) получим следующие выигрыши в точности для итерационной трехканальной системы при различных λ и ρ :

$$G_{31} = \frac{\overline{\delta^2}}{\overline{\varepsilon_3^2}} = \frac{\overline{\delta_{y\delta}^2} + \overline{\delta_{yf_1}^2}}{\overline{\varepsilon_{x,3}^2}(r_2, r_3) + \overline{\varepsilon_{f,3}^2}(r_2, r_3) + \overline{\varepsilon_{\varphi,3}^2}(r_2, r_3) + \overline{\varepsilon_{\psi,3}^2}(r_2, r_3)} = G_{31}(r_2, r_3); \quad (29)$$

$$G_{32} = \frac{\overline{\varepsilon_2^2}}{\overline{\varepsilon_3^2}} = \frac{\overline{\varepsilon_{x,2}^2}(r_2) + \overline{\varepsilon_{f,2}^2}(r_2) + \overline{\varepsilon_{\varphi,2}^2}(r_2)}{\overline{\varepsilon_{x,3}^2}(r_2, r_3) + \overline{\varepsilon_{f,3}^2}(r_2, r_3) + \overline{\varepsilon_{\varphi,3}^2}(r_2, r_3) + \overline{\varepsilon_{\psi,3}^2}(r_2, r_3)} = G_{32}(r_2, r_3). \quad (30)$$

Введем также показатели (выигрыши в точности):

$$g_{x,31} = \frac{\overline{\delta_{yx}^2}}{\overline{\varepsilon_{x,3}^2}(r_2, r_3)} = g_{x,31}(r_2, r_3); \quad g_{f,31} = \frac{\overline{\delta_{yf_1}^2}}{\overline{\varepsilon_{f,3}^2}(r_2, r_3)} = g_{f,31}(r_2, r_3);$$

$$g_{x,32} = \frac{\overline{\varepsilon_{x,2}^2}(r_2)}{\overline{\varepsilon_{x,3}^2}(r_2, r_3)} = g_{x,32}(r_2, r_3); \quad g_{f,32} = \frac{\overline{\varepsilon_{f,2}^2}(r_2)}{\overline{\varepsilon_{f,3}^2}(r_2, r_3)} = g_{f,32}(r_2, r_3);$$

$$g_{\varphi,32} = \frac{\overline{\varepsilon_{\varphi,2}^2(r_2)}}{\varepsilon_{\varphi,3}^2(r_2, r_3)} = g_{\varphi,32}(r_2, r_3), \quad (31)$$

характеризующие эффективность использования третьего, точного канала K -3 для компенсации ошибок по полезному сигналу $x(t)$, помехам $f(t)$ на первый и $\varphi(t)$ на второй каналы соответственно.

Оценка точности одноканальных следящих систем с эталонной и типовой настройкой канала управления. На основании (9), (11), (12) в результате применения оптимизационного алгоритма "OPERATOR" (четырепараметрическая задача: $n_1 = 3, m_1 = 1$) для типовых значений параметров входных воздействий:

$$S_{\&}(0) = 5 \cdot 10^{-2} \text{ рад}^2 \text{ с}^{-1}, S_{f_1}(0) = 10^{-6} \text{ рад}^2 \text{ с}, \\ T_{\&} = 10 \text{ с}, T_{f_1} = 0(0,1) \text{ с}, \quad (32)$$

в работе [7] при $d_{\varphi 2} = 0$ синтезирован следующий эталонный оператор первого (основного) канала:

$$W_{\varphi 1, \text{опт}}(p) = \frac{D_{\varphi 1, \text{опт}}(p)}{C_{\varphi 1, \text{опт}}(p)} = \frac{5,987p + 1}{p^3 + 4,954p^2 + 6,010p + 1}. \quad (33)$$

На основании метода ФП с учетом (1), (33) реальный оптимальный оператор первого канала можно представить в виде:

$$W_1^*(p) = W_{\varphi 1, \text{опт}}(r_1^* p) = \frac{5,987r_1^* p + 1}{(r_1^*)^3 p^3 + 4,954(r_1^*)^2 p^2 + 6,010r_1^* p + 1} = \\ = \frac{0,744p + 1}{0,192 \cdot 10^{-2} p^3 + 0,077 p^2 + 0,747 p + 1}, \quad (34)$$

где

$$r_1^* = \sqrt[3]{c_{3, \text{опт}}} = 0,1243 \text{ с} \quad (35)$$

– выделенный формирующий параметр первого канала с полученным оптимальным значением. При этом дисперсии ошибок (9), (10) и соответствующие среднеквадратические ошибки (отклонения) первого, грубого канала K -1 с оптимальной эталонной настройкой при $T_{f_1} = 0$ составляют:

$$\overline{\delta_{\&, \text{опт}}^2} = 1,923444 \cdot 10^{-6} \text{ рад}^2, \quad \overline{\delta_{\&, \text{опт}}} = \sqrt{\overline{\delta_{\&, \text{опт}}^2}} = 4,754752 \text{ угл. мин.}; \\ \overline{\delta_{\varphi f_1, \text{опт}}^2} = 5,703563 \cdot 10^{-6} \text{ рад}^2, \quad \overline{\delta_{\varphi f_1, \text{опт}}} = \sqrt{\overline{\delta_{\varphi f_1, \text{опт}}^2}} = 8,209961 \text{ угл. мин.};$$

$$\overline{\delta_{\varepsilon, \text{опт}}^2} = \overline{\delta_{\varepsilon x, \text{опт}}^2} + \overline{\delta_{\varepsilon f_1, \text{опт}}^2} = 7,627007 \cdot 10^{-6} \text{ рад}^2;$$

$$\overline{\delta_{\varepsilon, \text{опт}}} = \sqrt{\overline{\delta_{\varepsilon, \text{опт}}^2}} = 9,493909 \text{ угл. мин.} \quad (36)$$

Для сравнительной оценки полученного оптимального решения (33) ÷ (36) приведем аналогичные результаты оценки точности работы одно-канальных следящих ЭП с известными типовыми операторами третьего порядка при их оптимальной настройке на исходные данные (4), (32):

1. *Следящая система с оптимальным оператором типа фильтра Боттерворта 3-го порядка:*

$$W_{\varepsilon, \text{Ботт.}}(p) = \frac{1}{p^3 + 2p^2 + 2p + 1},$$

или с учетом (1)

$$W_{\text{Ботт.}}^*(p) = W_{\varepsilon, \text{Ботт.}}(r^* p) = \frac{1}{(r^*)^3 p^3 + 2(r^*)^2 p^2 + 2r^* p + 1} =$$

$$= \frac{1}{1,56 \cdot 10^{-5} \delta^3 + 1,25 \cdot 10^{-3} \delta^2 + 0,05 \delta + 1},$$

где $r^* = 0,025$ с – выделенный формирующий параметр с полученным оптимальным значением. При этом точность:

$$\overline{\delta_{\text{Ботт.}}^2} = 1,957422 \cdot 10^{-5} \text{ рад}^2, \quad \overline{\delta_{\text{Ботт.}}} = \sqrt{\overline{\delta_{\text{Ботт.}}^2}} = 15,2093 \text{ угл. мин.} \quad (37)$$

2. *Обобщенный реальный следящий привод [2]:*

$$W_{\varepsilon, \text{СП}}(p) = \frac{2,226p + 1}{p^3 + 1,757p^2 + 2,289p + 1},$$

или с учетом (1)

$$W_{\varepsilon, \text{СП}}(p) = W_{\varepsilon, \text{СП}}(rp) = \frac{2,226rp + 1}{r^3 p^3 + 1,757r^2 p^2 + 2,289rp + 1} =$$

$$= \frac{0,15p + 1}{0,306 \cdot 10^{-3} p^3 + 0,798 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,154p + 1},$$

где $r = 0,06738$ с – выделенный формирующий параметр с реальным значением. При этом точность:

$$\overline{\delta_{\text{СП}}^2} = 1,668305 \cdot 10^{-5} \text{ рад}^2, \quad \overline{\delta_{\text{СП}}} = \sqrt{\overline{\delta_{\text{СП}}^2}} = 14,041 \text{ угл. мин.} \quad (38)$$

3. *Реальная типовая система автосопровождения "SCR-584" [5]:*

$$W_{\varepsilon, \text{тип}}(p) = \frac{4,331p^2 + 3,501p + 1}{p^3 + 4,425p^2 + 3,524p + 1},$$

или с учетом (1)

$$\begin{aligned} W_{\text{тип}}(p) &= W_{\varepsilon, \text{тип}}(\beta p) = \\ &= \frac{4,331\beta^2 p^2 + 3,501\beta p + 1}{\beta^3 p^3 + 4,425\beta^2 p^2 + 3,524\beta p + 1} = \\ &= \frac{0,357p^2 + 1,005p + 1}{0,0237p^3 + 0,3647p^2 + 1,0117p + 1}, \end{aligned} \quad (39)$$

где $\beta = 0,2871 c$ – выделенный формирующий параметр с реальным значением. При этом точность:

$$\overline{\delta_{\text{тип}}^2} = 9,2890158 \cdot 10^{-6} \text{ рад}^2, \quad \overline{\delta_{\text{тип}}} = \sqrt{\overline{\delta_{\text{тип}}^2}} = 10,47738 \text{ угл. мин.} \quad (40)$$

Полученные результаты позволяют проанализировать точность работы одноканальных следящих систем при их описании операторами третьего порядка. Из сравнения результатов (36)-(38) и (40) видно, что следящая система (первый канал) с синтезированным эталонным оператором (34) при $\eta_1 = \eta_1^*$ (35) обладает наивысшей относительной установившейся точностью воспроизведения случайного полезного сигнала при наличии широкополосной помехи типа белого шума.

Результаты исследований. Приведем результаты сравнительной вероятностной оценки точности итерационных трехканальных следящих систем с операторами автономных каналов, соответствующими оптимальной эталонной настройке и некоторым другим рассмотренным типовым настройкам. Расчеты выполнены для следующих типовых значений параметров случайных входных воздействий:

$$S_{\mathbf{g}}(0) = 5 \cdot 10^{-2} \text{ рад}^2 c^{-1}, \quad S_f(0) = 10^{-6} \text{ рад}^2 c;$$

$$S_{\varphi}(0) = \lambda S_f(0) \text{ рад}^2 c \quad (\lambda = 0,1; \quad 0,01);$$

$$S_{\psi}(0) = \rho S_f(0) \text{ рад}^2 c \quad (\rho = 0,01; \quad 0,001);$$

$$T_{\mathbf{g}} = 10 c, \quad T_f = T_{\varphi} = T_{\psi} = 0(0,1) c$$

на основании формул (11), (12), (15)-(18) и (23)-(31) с учетом операторов и результатов оценки точности одноканальных систем, определяемых формулами (34), (36)-(40).

Обобщенные результаты сравнительного анализа точности итераци-

онной трехканальной САУ при различных настройках автономных каналов управления приведены в табл. 1 - 4.

Таблица 1

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_1^* = 0,1243; \lambda = 0,1 \text{ и } \rho = 0,01$$

Дисперсии ошибок трехканальной САУ (каналы $K-1, K-2, K-3$), рад ²	Выигрыши в точности	
	По сравнению с одноканальной САУ (канал $K-1$)	По сравнению с двухканальной САУ (каналы $K-1, K-2$)
$\overline{\varepsilon_{x,3}^2} = 1,215747\text{e-}007$	$g_{x,31} = 15,8211$	$g_{x,32} = 1,7038$
$\overline{\varepsilon_{f,3}^2} = 1,086777\text{e-}006$	$g_{f,31} = 3,0396$	$g_{f,32} = 1,2324$
$\overline{\varepsilon_{\phi,3}^2} = 1,339362\text{e-}007$	–	$g_{\phi,32} = 2,4664$
$\overline{\varepsilon_{\psi,3}^2} = 3,303375\text{e-}008$	–	–
$\overline{\varepsilon_3^2} = 1,375321\text{e-}006$	$G_{31} \approx 3,8004$ $(\overline{\delta_y^2} = 5,226819\text{e-}006)$	$G_{32} \approx 1,3647$ $(\overline{\varepsilon_2^2} = 1,876839\text{e-}006)$

Таблица 2

$$r_1 = r_1^* = 0,1243, r_2 = 0,01243, r_3 = 0,001243; \lambda = 0,01 \text{ и } \rho = 0,001$$

Дисперсии ошибок трехканальной САУ (каналы $K-1, K-2, K-3$), рад ²	Выигрыши в точности	
	По сравнению с одноканальной САУ (канал $K-1$)	По сравнению с двухканальной САУ (каналы $K-1, K-2$)
$\overline{\varepsilon_{x,3}^2} = 1,778197\text{e-}012$	$g_{x,31} = 1,0817\text{e+}006$	$g_{x,32} = 964,3673$
$\overline{\varepsilon_{f,3}^2} = 2,496213\text{e-}012$	$g_{f,31} = 1,3234\text{e+}006$	$g_{f,32} = 6,3523\text{e+}003$
$\overline{\varepsilon_{\phi,3}^2} = 2,290503\text{e-}011$	–	$g_{\phi,32} = 2,2661\text{e+}003$
$\overline{\varepsilon_{\psi,3}^2} = 5,056066\text{e-}009$	–	–
$\overline{\varepsilon_3^2} = 5,083246\text{e-}009$	$G_{31} \approx 1,0282\text{e+}003$ $(\overline{\delta_y^2} = 5,226819\text{e-}006)$	$G_{32} \approx 13,6676$ $(\overline{\varepsilon_2^2} = 6,947585\text{e-}008)$

В табл. 1, 2 рассмотрены результаты сравнительной оценки точности итерационной трехканальной следящей САУ и соответствующих ей одноканальной (канал $K-1$) и итерационной двухканальной (каналы $K-1$ и $K-2$) следящих систем с оптимальными эталонными операторами автономных каналов вида (34) при различном соотношении интенсивностей ($\lambda, \rho = \text{var}$) коррелированных ($T_f=T_\varphi=T_\psi=0,1 c$) случайных помех в каналах, при неоптимальном (табл. 1) и близком к оптимальному (табл. 2) соотношении заданных значений формирующих параметров каналов r_i ($i = 1, 2, 3$). В табл. 3, 4 приведены результаты сравнительной оценки точности итерационной трехканальной следящей САУ и соответствующих ей одноканальной (канал $K-1$) и итерационной двухканальной (каналы $K-1$ и $K-2$) следящих систем с операторами автономных каналов, настроенными на оператор реальной типовой системы автосопровождения "SCR-584" вида (39), при различном соотношении интенсивностей ($\lambda, \rho = \text{var}$) коррелированных ($T_f=T_\varphi=T_\psi=0,1 c$) случайных помех в каналах, и при неоптимальном (табл. 3) и близком к оптимальному (табл. 4) соотношении заданных значений формирующих параметров каналов r_i ($i = 1, 2, 3$).

Таблица 3

$$r_1 = r_1^* = 0,1243, r_2 = 0,01243, r_3 = 0,001243; \lambda = 0,01 \text{ и } \rho = 0,001$$

Дисперсии ошибок трехканальной САУ (каналы $K-1, K_2, K-3$), рад ²	Выигрыши в точности	
	По сравнению с одноканальной САУ (канал $K-1$)	По сравнению с двухканальной САУ (каналы $K-1, K-2$)
$\overline{\varepsilon_{x,3}^2} = 1,477023e-008$	$g_{x,31} = 30,4392$	$g_{x,32} = 2,8108$
$\overline{\varepsilon_{f,3}^2} = 4,225756e-007$	$g_{f,31} = 8,8843$	$g_{f,32} = 2,0571$
$\overline{\varepsilon_{\varphi,3}^2} = 8,692746e-008$	–	$g_{\varphi,32} = 4,3189$
$\overline{\varepsilon_{\psi,3}^2} = 3,754285e-008$	–	–
$\overline{\varepsilon_3^2} = 5,6181614e-007$	$G_{31} \approx 5,599$ ($\overline{\delta_y^2} = 4,2038788e-006$)	$G_{32} \approx 2,289$ ($\overline{\varepsilon_2^2} = 1,2862198e-006$)

Таблица 4

$$r_1 = r_1^* = 0,1243, r_2 = 0,01243, r_3 = 0,001243; \lambda = 0,01 \text{ и } \rho = 0,001$$

Дисперсии ошибок трехканальной САУ (каналы $K-1, K-2, K-3$), рад ²	Выигрыши в точности	
	По сравнению с одноканальной САУ (канал $K-1$)	По сравнению с двухканальной САУ (каналы $K-1, K-2$)
$\overline{\varepsilon_{x,3}^2} = 2,980285e-013$	$g_{x,31} = 1,5086e+006$	$g_{x,32} = 1,0024e+003$
$\overline{\varepsilon_{f,3}^2} = 1,354072e-011$	$g_{f,31} = 2,7726e+005$	$g_{f,32} = 899,9876$
$\overline{\varepsilon_{\varphi,3}^2} = 1,364172e-011$	–	$g_{\varphi,32} = 3,7958e+003$
$\overline{\varepsilon_{\psi,3}^2} = 5,027345e-009$	–	–
$\overline{\varepsilon_3^2} = 5,054826e-009$	$G_{31} \approx 831,6566$ $(\overline{\delta_y^2} = 4,2038788e-006)$	$G_{32} \approx 12,7140$ $(\overline{\varepsilon_2^2} = 6,42669892e-008)$

Таким образом, из табл. 1-4 видно, что для повышения точности воспроизведения случайного полезного сигнала при наличии аддитивных случайных помех, приводимых ко входу канала управления электромеханической следящей системы, может быть эффективно использован итерационный принцип многоканального воспроизведения, реализуемый с помощью соответствующих итерационных многоканальных электромеханических следящих САУ с эталонной настройкой.

Выводы. По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Впервые проанализирована вероятностная точность итерационных трехканальных следящих систем управления с учетом аддитивных случайных помех. Подтверждена потенциально высокая эффективность таких систем.

2. Показано, что потенциальная точность параметрически оптимальной итерационной трехканальной следящей системы с эталонной настройкой может быть на два порядка (и более) выше, чем соответствующей оптимальной одноканальной системы (первого, грубого канала), и на порядок (и более) выше, чем оптимальной итерационной двухканальной следящей системы, и зависит от коэффициентов λ и ρ соотношения интенсивностей случайных помех в автономных каналах управления.

3. Подтверждено, что на выходе итерационной трехканальной следящей системы эквивалентное задающее воздействие воспроизводится практически без искажений, т.е. достигается компенсация не только динамических ошибок воспроизведения узкополосного полезного сигнала $x(t)$, но и ошибок от воздействия достаточно широкополосных помех $f_1(t)$ и $f_2(t)$ на предшествующие грубый $K-1$ и компенсирующий $K-2$ каналы управления. Наличие помехи $f_3(t) \neq 0$ в последнем точном канале $K-3$ несколько ограничивает достижение максимально высокой точности воспроизведения с помощью трехканальной системы, так как ошибка, обусловленная $f_3(t)$, остается некомпенсированной. Вместе с тем, интенсивность помехи $f_3(t)$, как правило, весьма незначительна ($\rho \leq 0,01$).

4. Практически отработан с применением ПЭВМ обобщенный алгоритм расчета дисперсий ошибок электромеханических САУ методом рекуррентных уравнений К. Острема.

Полученные результаты могут быть использованы для решения задач параметрического и оптимального синтеза высокоточных многоканальных электромеханических следящих систем управления, построенных по итерационному принципу и функционирующих при случайных входных воздействиях. Результаты могут найти применение при проектировании итерационных двух- и трехканальных систем управления следящими ЭП повышенной точности.

В заключении отметим, что применение итерационных трехканальных следящих систем управления целесообразно в тех случаях, когда требуется очень высокая динамическая точность воспроизведения задающего воздействия при наличии существенных труднокомпенсируемых (в том числе с помощью итерационной двухканальной системы) случайных помех в контуре управления, или при значительных динамических нагрузках на выходе одноканальной следящей системы (первого, грубого канала) и сравнительно высокой инерционности ее элементов.

Список источников информации. 1. Осмоловский П.Ф. Итерационные многоканальные системы автоматического управления. – М.: Сов. Радио, 1969. – 256 с. **2.** Следящие приводы. В 2-х кн. / Под ред. Б.К. Чемоданова. Кн. Первая. – М.: Энергия, 1976. – 480 с. **3.** Многоканальные итерационные системы управления / Б.И. Кузнецов, А.А. Худяев, И.Н. Богаенко и др. – К.: НПК "КІА", 1998. – 244 с. **4.** Острем К.Ю. Введение в стохастическую теорию управления. – М.: Мир, 1973. – 322 с. **5.** Худяев А.А. Алгоритм расчета диспер-

сий ошибок многоканальных итерационных систем методом рекуррентных уравнений // Автоматика. – 1986. – №6. – С. 43-52. **6.** Худяев А.А. Влияние параметров случайных воздействий и полосы пропускания точного канала на качество итерационной двухканальной системы с эталонной настройкой // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2002. – №2 (8). – С. 148-156. **7.** Худяев А.А., Гвоздева Е.В. Параметрический синтез итерационных многоканальных систем с эталонной настройкой каналов // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2002. – С. 371-378. **8.** Худяев А.А., Гвоздева Е.В. Оценка эффективности параметрически оптимальных итерационных двухканальных систем управления // Электротехника (РФ). – 2003. – №4. – С. 8-12.



Худяев Александр Андреевич, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера по специальности "Автоматизированные системы управления" и диссертацию кандидата наук по специальности "Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование" в Харьковском политехническом институте соответственно в 1980 и 1996 гг. Доцент кафедры "Автоматизированные электромеханические системы" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2008 г.

Научные интересы связаны с проблемами идентификации, анализа, синтеза и автоматизации проектирования высокоточных многоканальных электромеханических систем управления, построенных по итерационному принципу.



Мишенюк Александр Иванович, магистрант кафедры "Автоматизированные электромеханические системы" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"

Поступила в редколлегию 20.05.2010