

ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ЦИФРОВЫХ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ АСУТП С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ. Ч. I. НИЗКИЙ ТЕМП ВЫЧИСЛЕНИЯ РАССОГЛАСОВАНИЯ

А. И. ЕРМОЛЕНКО, А. И. КОРШУНОВ

Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ „Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова“,
198514, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: a.i.korshunov@mail.ru

Рассмотрены цифровые следящие системы (ЦСС) с вычислительными устройствами, обеспечивающими низкий темп вычисления рассогласования, характерный для ЦСС автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) первых поколений. Возрастание скоростей изменения задающих воздействий требует повышения динамической точности ЦСС опорно-поворотных устройств. Радикальным средством повышения динамической точности является устранение скоростной ошибки и ошибки по ускорению ЦСС. Показано, что возможно значительное повышение динамической точности ЦСС АСУТП без существенного изменения самой ЦСС, с помощью управления по задающему воздействию, требующего его обработки по несложной программе, представленной в статье. Показано, что возможно получение высокого качества переходных процессов в замкнутом контуре, но при низком темпе вычисления рассогласования невозможно добиться низкой колебательности переходных процессов, вызванных скачками задающего воздействия.

Ключевые слова: компенсация, скоростная ошибка и ошибка по ускорению, низкий темп вычисления рассогласования

Для повышения производительности технологических процессов необходимо ужесточить требования к управляющим ими автоматизированным системам управления (АСУТП) и, в частности, к электромеханическим цифровым следящим системам (ЦСС). Увеличение скорости изменения управляющих воздействий, оцениваемой обычно их первой и второй производными по времени, вызывает повышение требований к динамической точности ЦСС, оцениваемой скоростной ошибкой и ошибкой по ускорению.

Исключение скоростной ошибки и ошибки по ускорению позволяет снять проблему снижения точности при увеличении скоростей и ускорений, разумеется, при нахождении их в пределах динамических возможностей исполнительных элементов ЦСС.

Исключение скоростной ошибки и ошибки по ускорению в рамках управления по отклонению требует повышения порядка астатизма ЦСС на две единицы, то есть от 1-го до 3-го. Как известно [1], это делает следящую систему „условно устойчивой“, поскольку уменьшение коэффициента преобразования, например вследствие насыщения усилителя, может вызвать ее неустойчивость. Кроме этого, корректирующее устройство (непрерывное или дискретное), повышающее порядок астатизма на две единицы, оказывается неустойчивым, поскольку его передаточная функция имеет полюс на границе устойчивости с кратностью 2, что крайне нежелательно.

Более перспективным представляется комбинированное управление, сочетающее управление по отклонению с управлением по задающему воздействию. Согласно работе [1], комбинированное управление особенно удобно применять, когда задающее воздействие вычисляется в ЭВМ, что соответствует рассматриваемому случаю. При этом дискретный фильтр

(ДФ), выполняющий дополнительную обработку этого воздействия, имеет невысокий порядок и только нулевые полюсы передаточной функции.

Использовать комбинированное управление для повышения точности систем автоматического управления предложил Г. В. Щипанов. В развитие его теории внесли важнейший вклад и другие наши соотечественники: В. С. Кулебакин, Б. Н. Петров, А. Г. Ивахненко, А. И. Кухтенко, Г. М. Уланов в работах, ставших классическими. Особенно успешно комбинированное управление применялось при проектировании высокоточных силовых следящих приводов ракетно-артиллерийских систем [3]. Интерес к комбинированному управлению сохраняется и в наше время. Его развитию посвящены работы В. О. Никифорова, Г. В. Лукьяновой, А. А. Бобцова [4—6] и др.

В случае неминимально-фазовых звеньев в замкнутом контуре управления возможности последовательной коррекции весьма ограничены [7]. При этом целесообразно высокое качество свободных процессов обеспечивать за счет коррекции обратными связями, а точность отработки задающих воздействий — путем управления по задающему воздействию [8]. Во многих случаях этот путь оказывается единственным при высоких требованиях к качеству управления [9, 10]. Такая же ситуация возникает и при необходимости повышения динамической точности действующих ЦСС, например в дуэльных ситуациях между подводными лодками применение торпедного оружия на маневре уклонения от вражеских торпед дает колоссальное преимущество. Боевые наставления запрещают пуск торпед на маневре [11]. Снижение точности ввода данных на маневре — одна из причин этого запрета, так как следящие системы не способны с приемлемой точностью вводить в торпеду быстро изменяющиеся данные. В работе [12] рассмотрен способ повышения точности ввода за счет компенсации скоростной ошибки путем добавления к задающему воздействию его первой разности и предложена методика динамического расчета ЦСС. В зарубежной литературе также имеются сведения о применении этого способа повышения точности цифровых следящих приводов (см., например, [13]).

При более динамичном изменении задающего воздействия ЦСС существенное снижение точности вызывает и ошибка по ускорению. Естественным путем повышения динамической точности ЦСС оказывается компенсация и ошибки по ускорению путем добавления к задающему воздействию слагаемого, пропорционального его второй разности.

Существенное влияние на свойства ЦСС комбинированного управления оказывает соотношение шага квантования по времени, определяющего темп вычисления рассогласования, и постоянных времени ее непрерывной части. Из-за ограниченных возможностей вычислительной техники шаг квантования по времени в ЦСС первых поколений оказывался значительно больше постоянных времени. В настоящее время шаг квантования по времени можно выбрать меньшим постоянных времени на порядок и более.

Задача настоящей статьи — рассмотреть особенности компенсации скоростной ошибки и ошибки по ускорению при низком темпе вычисления рассогласования.

Когда постоянные времени пренебрежимо малы в сравнении с периодом вычисления рассогласования, в передаточной функции (ПФ) приведенной непрерывной части (ПНЧ) ЦСС [14] можно учитывать только интегрирующие свойства исполнительного двигателя:

$$W_{\text{ПНЧ}}(p) = \frac{1 - e^{-pT}}{p} \frac{K}{p} = K \frac{e^{pT} - 1}{e^{pT}} \frac{1}{p^2}, \quad (1)$$

где K — коэффициент преобразования НЧ, T — период вычисления рассогласования в цифровом вычислительном устройстве (ЦВУ) ЦСС. Поскольку ЦВУ в рассматриваемых ЦСС не может осуществлять дискретную коррекцию ЦСС, передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы имеют соответственно вид [14]:

$$W(z, \varepsilon) = \frac{Kz}{z-1} z \left\{ \frac{1}{p^2} \right\} = \frac{KT \{ \varepsilon z + (1-\varepsilon) \}}{z-1}, \quad \Phi(z, \varepsilon) = \frac{W(z, \varepsilon)}{1+W(z, 0)} = \frac{KT \{ \varepsilon z + 1 - \varepsilon \}}{z-1 + KT}. \quad (2)$$

Условие устойчивости замкнутой ЦСС (2) [14] $KT < 2$ ограничивает динамическую точность ЦСС, вызывая увеличение важнейших для ЦСС скоростной ошибки и ошибки по ускорению.

На рис. 1 представлена структурная схема ЦСС комбинированного управления.

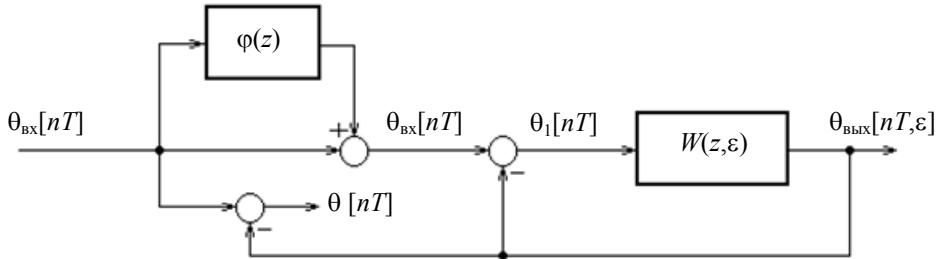


Рис. 1

Простейшая передаточная функция дискретного фильтра, позволяющая скомпенсировать скоростную ошибку и ошибку по ускорению ЦСС, имеет второй порядок, поскольку ДФ должен вводить в закон управления как первую, так и вторую разность задающего воздействия $\theta_{вх}[nT]$. Так как задающее воздействие заранее не известно,

$$\varphi(z) = q_2 + q_1 z^{-1} + q_0 z^{-2} = (q_2 z^2 + q_1 z + q_0) / z^2. \quad (3)$$

Передаточная функция замкнутой ЦСС комбинированного управления, согласно рис. 1, имеет вид [14]:

$$\Phi_{\text{к}}(z, \varepsilon) = \frac{[1 + \varphi(z)]W(z, \varepsilon)}{1 + W(z, 0)} = \frac{[(1 + q_2)z^2 + q_1 z + q_0]KT(\varepsilon z + (1 - \varepsilon))}{(z - 1 + KT)z^2}. \quad (4)$$

Передаточная функция эквивалентной ЦСС с управлением по отклонению в разомкнутом состоянии [15] получается в виде:

$$W_3(z, 0) = \frac{\Phi_{\text{к}}(z, 0)}{1 - \Phi_{\text{к}}(z, 0)} = \frac{[1 + \varphi(z)]W(z, 0)}{1 - \varphi(z)W(z, 0)}. \quad (5)$$

Подстановка формул (2) при $\varepsilon=0$ и выражения (4) в формулу (5) дает:

$$W_3(z, 0) = \frac{[(1 + q_2)z^2 + q_1 z + q_0]KT}{(z - 1)z^2 - (q_2 z^2 + q_1 z + q_0)KT} = \frac{[(1 + q_2)z^2 + q_1 z + q_0]KT}{z^3 - (z^2 + q_2 KT)z^2 - q_1 KTz - q_0 KT}. \quad (6)$$

При правильно выбранных значениях KT , q_2 , q_1 и q_0 знаменатель ПФ $W_3(z, 0)$ (6) обращается в $(z-1)^3$, следовательно,

$$z^3 - (z^2 + q_2 KT)z^2 - q_1 KTz - q_0 KT = z^3 - 3z^2 + 3z - 1.$$

Отсюда получаем:

$$q_2 KT = 2, \quad q_1 KT = -3, \quad q_0 KT = 1.$$

При $KT=1$ обеспечивается устойчивость замкнутого контура управления и полное затухание свободных процессов в нем за один период T [1, 14]:

$$q_2 = 2, \quad q_1 = -3, \quad q_0 = 1, \quad W_3(z, 0) = \frac{3z^2 - 3z + 1}{(z - 1)^3}, \quad \Phi_{\text{к}}(z, 0) = \frac{W_3(z, 0)}{1 + W_3(z, 0)} = \frac{3z^2 - 3z + 1}{z^3}. \quad (7)$$

Переходная характеристика $h(t)$ ЦСС комбинированного управления при нулевом полюсе $\Phi(z, \varepsilon)$ представлена на рис. 2, а.

Из рис. 2, *a* определяем перерегулирование $\sigma=200\%$ и время полного затухания переходного процесса $3T$ (время переходного процесса $t_{\pi} < 3T$). Например, при $KT=0,5$ (рис. 2, *б*)

$$q_2 = 4, \quad q_1 = -6, \quad q_0 = 2, \quad \Phi_k(z, 0) = \frac{(2+KT)z^2 - 3z + 1}{(z-1)^3 + 2,5z^2 - 3z + 1} = \frac{2,5z^2 - 3z + 1}{z^2(z-0,5)}.$$

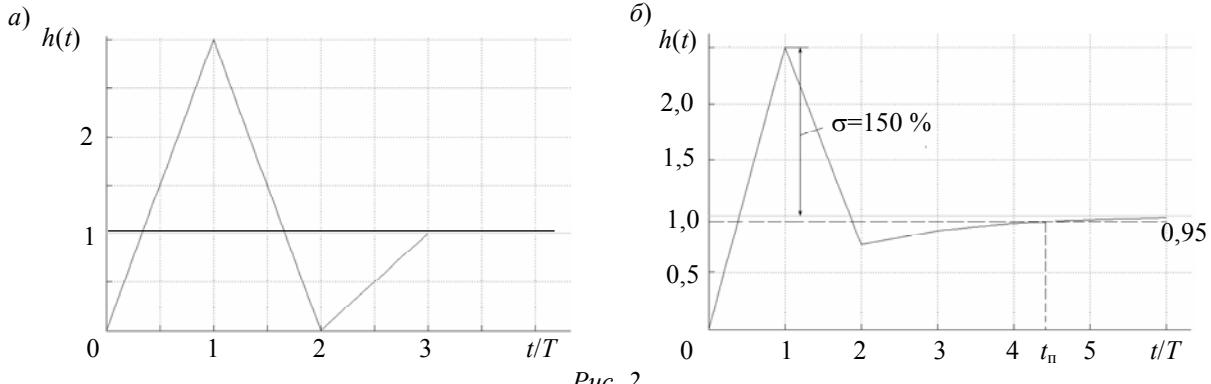


Рис. 2

Уменьшение KT до $0,5$ позволяет снизить перерегулирование комбинированной ЦСС до 150% , но при этом свободный процесс в замкнутом контуре затухает значительно медленнее. Уменьшая только KT , нельзя уменьшить σ даже до 100% . Дискретный фильтр с передаточной функцией (4) имеет только нулевые полюсы и, следовательно, устойчив, в отличие от корректирующего устройства, повышающего порядок астатизма замкнутого контура ЦСС с 1 до 3.

Учитывая постоянные времени НЧ, получаем [16]:

$$\begin{aligned} W(z, 0) &= \frac{K(z-1)}{z} z \left\{ \frac{1}{p^2(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \right\} = \\ &= KT \left[\frac{1}{z-1} - \frac{T_1 + T_2}{T} + \frac{T_1^3}{T(T_2 - T_1)} \frac{z-1}{z-d_1} + \frac{T_2^3}{T(T_1 - T_2)} \frac{z-1}{z-d_2} \right] = \\ &= \frac{\beta_2 z^2 + \beta_1 z + \beta_0}{(z-1)(z-d_1)(z-d_2)}, \quad d_i = e^{-T/T_i}, \quad \beta_i = \text{const}, \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (8)$$

Нетрудно проверить справедливость тождества:

$$\lim_{z \rightarrow 1} (z-1)W(z, 0) = KT. \quad (9)$$

Как известно [14], для компенсации скоростной ошибки необходим ДФ с передаточной функцией:

$$\varphi(z) = \frac{1}{KT} (1 - z^{-1}),$$

в этом случае, согласно (5),

$$\Phi_k(z, 0) = \frac{[1 + \varphi(z)]W(z, 0)}{1 + W(z, 0)} = \frac{[1 + (1 - z^{-1})/KT]W(z, 0)}{1 + W(z, 0)},$$

откуда получим передаточную функцию ЦСС комбинированного управления по ошибке при компенсации скоростной ошибки этой системы:

$$\Phi_{xk}(z, 0) = 1 - \Phi_k(z, 0) = \frac{1 - (1 - z^{-1})W(z, 0)/KT}{1 + W(z, 0)}.$$

Ошибка по ускорению этой ЦСС (установившаяся ошибка при $\theta_{\text{bx}}[nT]=0,5\epsilon_{\text{bx}}(nT)^21[nT]$, $\Theta_{\text{bx}}(z)=z\{\theta_{\text{bx}}[nT]\}=\frac{\epsilon_{\text{bx}}T^2}{2}\frac{z(z+1)}{(z-1)^3}$) имеет значение:

$$\theta_{\epsilon}=\lim_{z \rightarrow 1}(z-1)\Phi_{xk}(z)\frac{\epsilon_{\text{bx}}T^2}{2}\frac{z(z+1)}{(z-1)^3}=\epsilon_{\text{bx}}T^2 \lim_{z \rightarrow 1} \frac{1-(1-z^{-1})W(z,0)/KT}{(z-1)[z-1+(z-1)W(z,0)]}=$$

$$=\frac{\epsilon_{\text{bx}}T^2}{KT} \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-(z-1)W(z,0)/KT}{(z-1)}=\frac{\epsilon_{\text{bx}}T^2}{KT} \lim_{z \rightarrow 1} \left\{1-\frac{d}{dz}[(z-1)W(z,0)/KT]\right\}=\frac{\epsilon_{\text{bx}}T^2}{KT} \left(1+\frac{T_1+T_2}{T}\right).$$

При вычислении предела использованы правило Лопитала и предельное соотношение (9). Дифференцирование функции $(z-1)W(z,0)/KT$ выполнено с учетом выражения (8).

Для компенсации ошибки по ускорению к $\theta_{\text{bx}}[nT]$ необходимо прибавить ее вторую разность:

$$\Delta^2\theta_{\text{bx}}[nT]=\theta_{\text{bx}}[nT]-2\theta_{\text{bx}}[(n-1)T]+\theta_{\text{bx}}[(n-2)T]=$$

$$=\frac{\epsilon_{\text{bx}}T^2}{2}\{n^2-2(n-1)^2+(n-2)^2\}=\epsilon_{\text{bx}}T^2,$$

умноженную на коэффициент τ_2 , обеспечивающий равенство добавки и ошибки по ускорению θ_{ϵ} : $\tau_2\epsilon_{\text{bx}}T^2=\theta_{\epsilon}=\frac{\epsilon_{\text{bx}}T^2}{KT}\left(1+\frac{T_1+T_2}{T}\right)$, следовательно

$$\tau_2=\frac{T+T_1+T_2}{KT^2}.$$

Таким образом, в случае компенсации обеих ошибок

$$\varphi(z)=\frac{1}{KT}(1-z^{-1})+\frac{T+T_1+T_2}{KT^2}(1-z^{-1})^2. \quad (10)$$

Применив эту формулу к рассмотренному выше случаю $T_1=T_2=0$, $KT=1$, получим:

$$\varphi(z)=(1-z^{-1})+(1-z^{-1})^2=2-3z^{-1}+z^{-2},$$

что совпадает с результатом, достигнутым ранее другим способом.

Для оценки влияния постоянных времени НЧ на характер процессов рассмотрим ЦСС с типичными параметрами: $KT=1$, $T_1/T=0,2$, $T_2/T=0,1$. Согласно формуле (10), получаем:

$$\varphi(z)=(1-z^{-1})+1,3(1-z^{-1})^2=2,3-3,6z^{-1}+1,3z^{-2}.$$

На рис. 3 представлена переходная характеристика $h(t)$ ЦСС комбинированного управления, учитывающая постоянные времени НЧ $T_1/T=0,2$, $T_2/T=0,1$ (2) и исходная $h(t)$, полученная без учета постоянных времени НЧ $T_1=0$, $T_2=0$ (1).

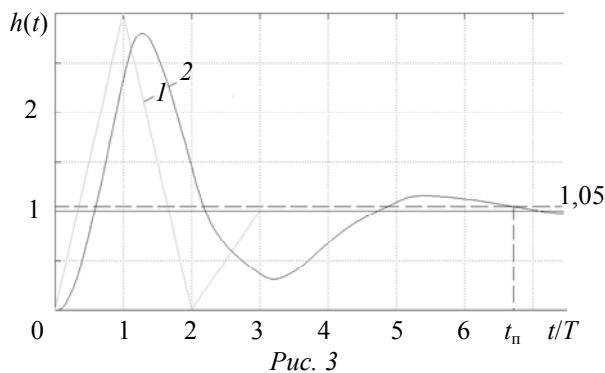


Рис. 3

Из рис. 3 видно, что относительно небольшие постоянные времени НЧ незначительно уменьшают перерегулирование, но существенно увеличивают время переходного процесса.

На характер свободного процесса в замкнутом контуре ЦСС постоянные времена НЧ, даже незначительные, оказывают отрицательное влияние. Так, переходная характеристика при отсутствии ДФ в рассматриваемом примере имеет $\sigma=25\%$, $t_n=5T$, вместо $\sigma=0$, $t_n=T$ при $T_1=0$, $T_2=0$.

На рис. 4 представлены ошибки ЦСС с управлением по отклонению — θ_1 и ЦСС комбинированного управления — θ_2 при гармоническом воздействии $\theta_{bx} = \theta_{bx m} \sin(\omega t)$, $\theta_{bx m} = 25^\circ$, $\omega = 2 \text{ c}^{-1}$ ($T_1=0,02$, $T_2=0,01$, $T=0,1 \text{ с}$).

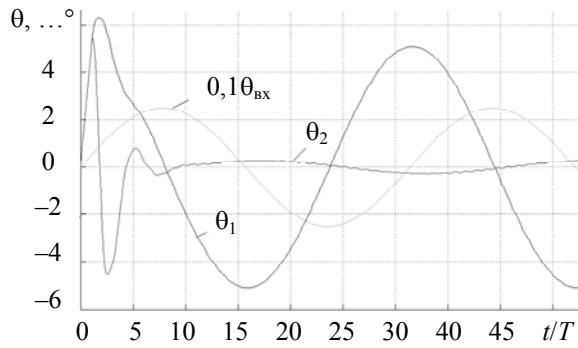


Рис. 4

Из рис. 4 следует, что комбинированное управление повысило динамическую точность ЦСС почти на два порядка.

Таким образом, по работе можно сделать следующие выводы:

1) возможно существенно повысить динамическую точность ЦСС АСУТП первых поколений с низким темпом вычисления рассогласования без существенного изменения самой ЦСС при использовании управления по задающему воздействию;

2) возможно получить высокое качество переходных процессов в замкнутом контуре, но невозможно добиться низкой колебательности переходных процессов, вызванных задающим воздействием;

3) во многих случаях, когда определяющими являются требования к качеству свободных процессов, предложенный способ повышения динамической точности вполне приемлем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский В. А. Цифровые автоматические системы. М.: Наука, 1976. 575 с.
2. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. 768 с.
3. Яворский В. Н., Бессонов Ф. Ф., Потапов А. М. Проектирование инвариантных следящих приводов. М.: Высш. школа, 1963. 428 с.
4. Лукьянова Г. В., Никифоров В. О. Алгоритм компенсации внешних детерминированных возмущений: операторный метод синтеза // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2003. № 10. С. 5—10.
5. Бобцов А. А., Лукьянова Г. В., Никифоров В. О. Алгоритм компенсации внешнего гармонического возмущения неизвестной частоты для систем активной виброзащиты // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 11. С. 39—43.
6. Никифоров В. О., Лукьянова Г. В. Следящая система комбинированного управления // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2011. Т. 76, № 6. С. 39—43.
7. Соловьевников В. В., Филимонов Н. Б. Динамическое качество систем автоматического регулирования: Учеб. пособие. М.: Изд-во МВТУ им. М.Э. Баумана, 1987. 84 с.
8. Коршунов А. И. Коррекция свойств систем автоматического управления путем преобразования задающего воздействия // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 10. С. 813—821.

9. Коршунов А. И. Оценка свойств замкнутых систем с периодическим высокочастотным изменением структуры по предельной непрерывной модели // Матер. XXI Межвуз. науч.-техн. конф. „Военная радиоэлектроника: опыт исследования и проблемы, подготовка специалистов“. Петродворец: ВМИРЭ им. А. С. Попова, 2010. Ч. III. С. 176—191.
10. Коршунов А. И. Повышение качества стабилизации выходного напряжения импульсного преобразователя постоянного тока // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 3. С. 48—57.
11. Криворучек А. Российский подводный флот получит преимущество в дуэлях // Известия. 24 апреля 2014.
12. Ермоленко А. И. Повышение точности цифровых следящих систем при вводе данных в торпедное оружие на маневре уклонения // Матер. XV молодежной науч.-техн. конф. „ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ-2017“. СПб: ЦКБ МТ „Рубин“, 2017. С. 239—249.
13. Квасников В. П., Осмоловский О. И. Підвищення динамічної точності систем автоматичного регулювання координатних вимірювальних машин // IX Междунар. науч.-практ. конф. „ССПОИ-2005“. Черкассы: ЧГТУ, 2005. С. 155—157.
14. Коршунов А. И. Основы теории управления. Ч. II. Основы теории и систем автоматического управления. Петродворец: ВМПИ, 2017. 167 с.
15. Бесекерский В. А., Федоров С. М. Применение эквивалентной передаточной функции при расчете следящих систем комбинированного управления // Тр. I Междунар. конгр. по автоматическому управлению. М.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. I. С. 154—165.
16. Коршунов А. И. Основы теории управления. Руководство к курсовому проектированию. Петродворец: ВМУРЭ им. А. С. Попова, 1998. 136 с.

Сведения об авторах

Артем Игоревич Ермоленко

— курсант; Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ „Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова“, факультет САУ

Анатолий Иванович Коршунов

— д-р техн. наук, профессор; Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ „Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова“, кафедра радиоэлектроники; E-mail: a.i.korshunov@mail.ru

Поступила в редакцию
30.08.17 г.

Ссылка для цитирования: Ермоленко А. И., Коршунов А. И. Повышение динамической точности цифровых следящих систем АСУТП с помощью комбинированного управления. Ч. I. Низкий темп вычисления рассогласования // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 4. С. 309—316.

**INCREASING THE DYNAMIC ACCURACY OF DIGITAL FOLLOWING SYSTEMS OF AUTOMATION
INDUSTRIAL CONTROL SYSTEM WITH THE USE OF COMBINED CONTROL.
PART I. LOW SPEED OF MISMATCH CALCULATION**

A. I. Ermolenko, A. I. Korshunov

*Naval Polytechnic Institute "N. G. Kuznetsov Naval Academy",
198514, St. Petersburg, Russia
E-mail: a.i.korshunov@mail.ru*

Digital following systems with calculation devices providing a low speed of mismatch evaluation characteristic for automated control systems of industrial process of first generations. An increase in the rate of change of the driving influences requires an improvement in dynamic accuracy of the DCS of the support-rotary devices. A radical means of increasing dynamic accuracy is the elimination of the speed error and errors in the acceleration of the MSC. It is shown that an effective increase in the dynamic accuracy of the automatic control system of the automated process control system is possible to achieve without significant changes to the MSC itself, with the help of the control for the mastering signal being processed according to the proposed algorithm. The possibility to obtain a high quality of transient processes in a closed loop is demonstrated, while at a low rate of error calculation it is impossible to achieve low oscillation of the transient processes caused by jumps of the driving force.

Keywords: compensation, high-speed mistake and acceleration mistake, low speed of mismatch calculation

Data on authors

- Artem I. Ermolenko** — Cadet, Naval Polytechnic Institute "N. G. Kuznetsov Naval Academy", Department of Automatic Control Systems
- Anatoly I. Korshunov** — Dr. Sci., Professor; Naval Polytechnic Institute "N. G. Kuznetsov Naval Academy", Department of Radio Electronics;
E-mail: a.i.korshunov@mail.ru

For citation: Ermolenko A. I., Korshunov A. I. Increasing the dynamic accuracy of digital following systems of automation industrial control system with the use of combined control. Part I. Low speed of mismatch calculation. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 4. P. 309—316 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-4-309-316