

## ГЛАВА 4

### КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЧАП С АСТАТИЗМОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА И КОМПЕНСАЦИЕЙ КОМПЛЕКСНО-СОПРЯЖЕННЫХ КОРНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

В главе 3 проанализированы динамические характеристики системы ЧАП с принципом управления по отклонению, астатизм первого порядка которой достигнут путем включения в систему интегрирующего элемента. Далее, построим функциональную схему и математическую модель системы ЧАП, повышение динамической точности и быстродействия которой достигаются путем введения разомкнутой связи по возмущающему воздействию, синтезированной в соответствии с условием повышения порядка астатизма с первого до второго и условием компенсации комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения, т.е. построением комбинированной системы ЧАП.

Анализ динамических характеристик системы ЧАП с астатизмом первого порядка показал, что система, построенная на основании принципа управления по отклонению с астатизмом первого порядка, имеет сравнительно низкие показатели качества. При возрастающих требованиях к качеству передачи и преобразованию дискретной информации показатели качества системы ЧАП с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка не полностью удовлетворяют этим требованиям. Поэтому возникает проблема повышения динамической точности и быстродействия систем ЧАП.

Как известно, одним из способов уменьшения динамических ошибок систем автоматического управления, к которым относится и система ЧАП, является повышение коэффициента усиления системы в разомкнутом состоянии  $k_p$ . Однако при увеличении  $k_p$ , как показано в главе 3, уменьшается запас устойчивости системы, что приводит к ухудшению переходных процессов, уменьшению ее бы-

стродействия, т.е. в системах ЧАП с принципом управления по отклонению существует противоречие между условиями повышения динамической точности и устойчивости (условием повышения показателей качества переходных процессов).

Противоречия между условиями повышения динамической точности и устойчивости (условием улучшения переходного процесса) исключаются при построении систем автоматического управления с принципом комбинированного управления, т.е. сочетания принципа управления по отклонению (реализуемого с помощью отрицательной обратной связи) и принципа управления по возмущению. Последний реализуется с помощью разомкнутой связи по задающему (возмущающему) воздействию. Эта связь не влияет на устойчивость замкнутой части системы, поэтому ее параметры могут быть синтезированы в соответствии с условиями повышения показателей качества системы – условиями повышения динамической точности, минимизации среднеквадратических ошибок, повышения быстродействия, не заботясь об устойчивости системы [6, 26].

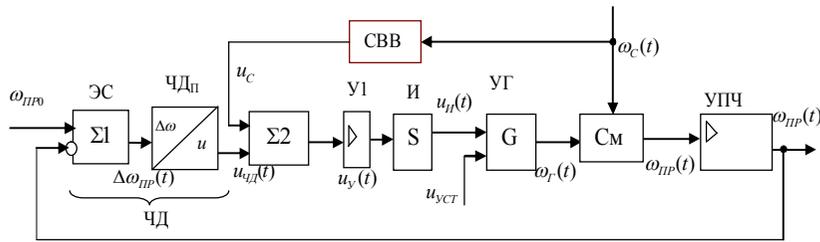
Несмотря на ухудшение переходного процесса и увеличение среднеквадратической ошибки системы с принципом управления по отклонению, астатизм первого порядка которой достигнут включением интегрирующего элемента в замкнутый контур (рис. 3.1), [по сравнению со статической системой (рис. 1.1) и комбинированной системой с астатизмом первого порядка (рис. 2.1)] для дальнейшего исследования с целью повышения показателей качества выбираем эту систему, т.к. она уже обладает астатизмом первого порядка и в ней устранена основная и ограничена скоростная динамические ошибки.

Для повышения динамической точности и быстродействия системы ЧАП (рис. 3.1) введем разомкнутую связь по возмущающему воздействию, синтезированную в соответствии с условиями повышения порядка астатизма с первого до второго и быстродействия системы, т.е. построим систему ЧАП с принципом комбинированного управления.

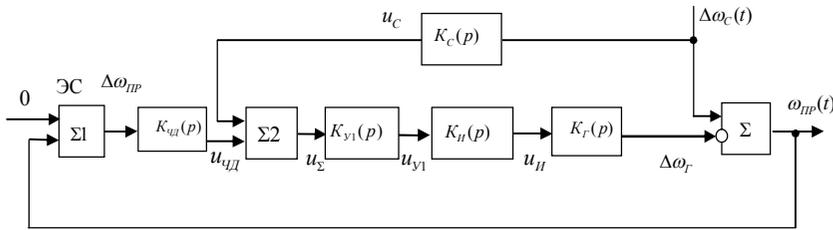
**4.1. Функциональная схема и математическая модель комбинированной системы ЧАП с астатизмом второго порядка и повышенным быстродействием**

Замкнутая часть функциональной схемы комбинированной системы ЧАП (рис. 4.1 а) изображена на рис. 3.1. Ее особенностью является то, что преобразование статической системы ЧАП (рис. 1.1 а, б) в систему с астатизмом первого порядка достигнуто путем включения в замкнутый контур системы интегрирующего элемента И.

Новым элементом комбинированной системы (рис. 4 а) по сравнению с системой ЧАП с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка (рис. 3.1) является введенная разомкнутая связь по возмущающему воздействию СВВ, с помощью которой на сумматор  $\Sigma 2$  подается сигнал, являющийся функцией возмущающего воздействия  $\omega_C(t)$ .



а



б

Рис. 4.1. Функциональная схема (а) и математическая модель (б) комбинированной системы ЧАП с астатизмом второго порядка и повышенным быстродействием

На математической модели, показанной на рис. 4.1 б, представлены передаточные функции элементов системы:

$$\left. \begin{aligned}
 K_{\text{ЧД}}(p) &= \frac{u_{\text{ЧД}}(p)}{\Delta\omega_{\text{ПР}}(p)} = \frac{k_{\text{ЧД}}}{T_{\text{ЧД}}p + 1} = \frac{D_{\text{ЧД}}(p)}{F_{\text{ЧД}}(p)}, \\
 \text{где } k_{\text{ЧД}} &= 1, T_{\text{ЧД}} = 0,005 \text{ – частотного дискриминатора ЧД}_{\text{П}}; \\
 K_{\text{У1}}(p) &= k_{\text{У1}} = \frac{D_{\text{У}}(p)}{F_{\text{У}}(p)}, \\
 \text{где } k_{\text{У1}} &= 20 \text{ – усилителя У1}; \\
 K_{\text{И}}(p) &= \frac{u_{\text{И}}(p)}{u_{\text{У}}(p)} = \frac{k_{\text{И}}}{p} = \frac{D_{\text{И}}(p)}{F_{\text{И}}(p)}, \\
 \text{где } k_{\text{И}} &= 1 \text{ – интегратора}; \\
 K_{\text{Г}}(p) &= \frac{\Delta\omega_{\text{Г}}(p)}{u_{\text{И}}(p)} = \frac{k_{\text{Г}}}{T_{\text{Г}}p + 1} = \frac{D_{\text{Г}}(p)}{F_{\text{Г}}(p)}, \\
 \text{где } k_{\text{Г}} &= 1, T_{\text{Г}} = 0,1 \text{ – управляемого генератора УГ}; \\
 K_{\text{С}}(p) &= \frac{\Delta\omega_{\text{С}}(p)}{u_{\text{С}}(p)} = \frac{D_{\text{С}}(p)}{F_{\text{С}}(p)} \text{ – передаточная функция связи} \\
 &\text{по возмущающему воздействию.}
 \end{aligned} \right\} (4.1)$$

**Анализ математической модели комбинированной системы ЧАП.** В соответствии с математической моделью (рис. 4.1 б) комбинированная система ЧАП описывается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta\omega_{\text{ПР}}(p) &= \Delta\omega_{\text{С}}(p) - \Delta\omega_{\text{Г}}(p); \\
 \Delta\omega_{\text{Г}}(p) &= K_{\text{ЧД}}(p)K_{\text{У1}}(p)K_{\text{И}}(p)K_{\text{Г}}(p)\Delta\omega_{\text{ПР}}(p) + \\
 &+ K_{\text{С}}(p)K_{\text{У1}}(p)K_{\text{И}}(p)K_{\text{Г}}(p)\Delta\omega_{\text{С}}(p).
 \end{aligned} \right\} (4.2)$$

Исключив из системы  $\Delta\omega_{\text{Г}}(t)$ , получим

$$\begin{aligned} \Delta\omega_C(p) - \Delta\omega_{\text{ПР}}(p) &= \\ &= K_{\text{ЧД}}(p)K_{\text{V1}}(p)K_{\text{И}}(p)K_{\text{Г}}(p)\Delta\omega_{\text{ПР}}(p) + \\ &+ K_C(p)K_{\text{V1}}(p)K_{\text{И}}(p)K_{\text{Г}}(p)\Delta\omega_C(p); \\ [1 + K_{\text{ЧД}}(p)K_{\text{V1}}(p)K_{\text{И}}(p)K_{\text{Г}}(p)]\Delta\omega_{\text{ПР}}(p) &= \\ = [1 - K_C(p)K_{\text{V1}}(p)K_{\text{И}}(p)K_{\text{Г}}(p)]\Delta\omega_C(p). \end{aligned} \quad (4.3)$$

Согласно выражению (4.3) передаточная функция комбинированной системы ЧАП по ошибке равна

$$\begin{aligned} K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p) &= \frac{\Delta\omega_{\text{ПР}}(p)}{\Delta\omega_C(p)} = \frac{1 - K_C(p)K_{\text{V1}}(p)K_{\text{И}}(p)K_{\text{Г}}(p)}{1 + K_{\text{ЧД}}(p)K_{\text{V1}}(p)K_{\text{И}}(p)K_{\text{Г}}(p)} = \\ &= \frac{D_{\omega_{\text{ПР}}}(p)}{F_{\omega_{\text{ПР}}}(p)}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Подставив в (4.4) значение передаточной функции  $K_i(p) = \frac{D_i(p)}{F_i(p)}$ , получим

$$\begin{aligned} K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p) &= \frac{\Delta\omega_{\text{ПР}}(p)}{\Delta\omega_C(p)} = \frac{1 - \frac{D_C(p)}{F_C(p)} \cdot \frac{D_{\text{V1}}(p)}{F_{\text{V1}}(p)} \cdot \frac{D_{\text{И}}(p)}{F_{\text{И}}(p)} \cdot \frac{D_{\text{Г}}(p)}{F_{\text{Г}}(p)}}{1 + \frac{D_{\text{ЧД}}(p)}{F_{\text{ЧД}}(p)} \cdot \frac{D_{\text{V1}}(p)}{F_{\text{V1}}(p)} \cdot \frac{D_{\text{И}}(p)}{F_{\text{И}}(p)} \cdot \frac{D_{\text{Г}}(p)}{F_{\text{Г}}(p)}}} = \\ &= \frac{[F_C(p)F_{\text{V1}}(p)F_{\text{И}}(p)F_{\text{Г}}(p) - D_C(p)D_{\text{V1}}(p)D_{\text{И}}(p)D_{\text{Г}}(p)]F_{\text{ЧД}}(p)}{[F_{\text{ЧД}}(p)F_{\text{V1}}(p)F_{\text{И}}(p)F_{\text{Г}}(p) + D_{\text{ЧД}}(p)D_{\text{V1}}(p)D_{\text{И}}(p)D_{\text{Г}}(p)]F_C(p)} = \\ &= \frac{D_{\omega_{\text{ПР}}}(p)}{F_{\omega_{\text{ПР}}}(p)}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

После подстановки в (4.5) значений передаточных функций элементов из главы 1 получим передаточную функцию системы:

$$\begin{aligned} K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p) &= \frac{\Delta\omega_{\text{ПР}}(p)}{\Delta\omega_C(p)} = \\ &= \frac{[F_C(p)(T_{\text{Г}}p + 1)p - D_C(p)k_{\text{V1}}k_{\text{И}}k_{\text{Г}}](T_{\text{ЧД}}p + 1)}{[(T_{\text{ЧД}}p + 1)p(T_{\text{Г}}p + 1) + k_{\text{V1}}k_{\text{И}}k_{\text{Г}}k_{\text{ЧД}}]F_C(p)} = \frac{D_{\omega_{\text{ПР}}}(p)}{F_{\omega_{\text{ПР}}}(p)}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

В соответствии с передаточной функцией (4.6) условием абсолютной инвариантности ошибки  $\Delta\omega_{\text{ПР}}$  относительно возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C$  является выражение

$$F_C(p)(T_{\text{Г}}p + 1)p - D_C(p)k_{\text{V1}}k_{\text{И}}k_{\text{Г}} = 0. \quad (4.7)$$

Выясним, возможен ли выбор  $D_C(p)$  и  $F_C(p)$  в соответствии с условием инвариантности (4.7) с точки зрения устойчивости системы.

В результате сравнения условия инвариантности (4.7) и характеристического уравнения комбинированной системы

$$[(T_{\text{Г}}p + 1)(T_{\text{ЧД}}p + 1)p + k_p]F_C(p) = 0, \quad (4.8)$$

где  $k_p = k_{\text{V1}}k_{\text{И}}k_{\text{Г}}$  – коэффициент усиления системы в разомкнутом состоянии, видно, что полином  $D_C(p)$  (числитель передаточной функции  $K_C(p)$ ) входит только в условие инвариантности. Поэтому его выбор из условия инвариантности не влияет на устойчивость системы. Полином  $F_C(p)$  [знаменатель передаточной функции  $K_C(p)$ ] входит как в условие инвариантности (4.7), так и в характеристическое уравнение (4.8). Из формулы (4.8) видно, что  $F_C(p)$  входит в характеристический полином системы в виде сомножителя. Поэтому с введением связи по возмущающему воздействию корни характеристического уравнения (устойчивость) замкнутой части системы не изменяются, а появляются лишь новые корни, определяемые характеристическим уравнением  $F_C(p) = 0$ . Они определяют устойчивость разомкнутой части комбинированной системы – связи по возмущающему воздействию. В разомкнутых системах обычно не возникает проблемы устойчивости, поэтому в комбинированной системе выбор полиномов  $D_C(p)$  и  $F_C(p)$  из условия инвариантности не приводит к потере устойчивости. Отсюда можно сделать вывод, что в комбинированных системах ЧАП со связью по возмущающему воздействию нет противоречия между условием инвариантности  $\Delta\omega_{\text{ПР}}$  относительно  $\Delta\omega_C$  и условием устойчивости.

В соответствии с условием абсолютной инвариантности (4.7) передаточная функция связи по возмущающему воздействию должна быть равна

$$K_C(p) = \frac{D_C(p)}{F_C(p)} = \frac{(T_T p + 1)p}{k_{y1} k_{II} k_T}. \quad (4.9)$$

Из этого выражения видно, что передаточная функция связи по возмущающему воздействию  $K_C(p)$ , соответствующая абсолютной инвариантности, физически не реализуема (степень числителя больше степени знаменателя), поэтому абсолютная инвариантность в системе ЧАП недостижима. Однако отсутствие возможности достижения абсолютной инвариантности не означает, что в комбинированной системе ЧАП нельзя получить высокую динамическую точность и быстродействие ЧАП.

Таким образом, в комбинированной системе ЧАП введение связи по возмущающему воздействию  $\Delta\omega_C$  не влияет на устойчивость замкнутого контура системы, поэтому параметры этой связи могут быть синтезированы в соответствии с требованиями повышения показателей качества системы, однако абсолютная инвариантность не достигается.

#### 4.2. Синтез связи по возмущающему воздействию комбинированной системы ЧАП с астатизмом второго порядка и компенсацией комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения

Выполнен синтез связи по возмущающему воздействию комбинированной системы ЧАП (рис. 4.1 б) в соответствии с условиями повышения динамической точности и быстродействия системы при комплексных корнях характеристического уравнения системы.

##### 4.2.1. Вид передаточной функции связи по возмущающему воздействию в соответствии с условиями повышения динамической точности и быстродействия системы ЧАП

Как показано в параграфе 4.1, передаточная функция связи по возмущающему воздействию  $K_C(p)$ , соответствующая абсолютной инвариантности, физически нереализуема, поэтому абсолютная ин-

вариантность в системе ЧАП недостижима. Таким образом, поставим более скромную задачу – повысить динамическую точность и быстродействие комбинированной системы ЧАП по сравнению с системой с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка (рис. 3.1 б).

Ограничимся требованием полного устранения скоростной динамической ошибки и потребуем, чтобы ошибка при квадратичном законе изменения задающего воздействия не стремилась к бесконечности, а имела конечное значение. Эти, а также требование уменьшения среднеквадратической ошибки можно удовлетворить путем повышения порядка астатизма системы относительно возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C$  с первого до второго.

Повышения порядка астатизма с первого до второго можно добиться подачей в систему через разомкнутую компенсационную связь первой производной возмущающего воздействия [16].

Повысить быстродействие системы ЧАП можно методом компенсации слабозатухающих компонент переходной составляющей ошибки с помощью связи по задающему воздействию [6, 26].

Компонента переходного процесса (кривая 1 на рис. 3.4), соответствующая паре комплексно-сопряженных корней

$$p_1 = -4,470265089 + j13,37535456,$$

$$p_2 = -4,470265089 - j13,37535456$$

характеристического уравнения замкнутого контура системы, является медленно затухающей компонентой, имеющей колебательный характер и определяющей время переходного процесса системы ( $t_p = 1,05$  с). Поэтому повышения быстродействия системы можно добиться, если устранить данную компоненту переходного процесса, компенсируя два комплексно-сопряженных корня ( $p_1$  и  $p_2$ ) характеристического уравнения. Для компенсации двух комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения необходимо в систему с помощью разомкнутой связи подать две (вторую и третью) производных возмущающего воздействия.

В соответствии с перечисленными требованиями через разомкнутую компенсационную связь в систему необходимо подавать три производных возмущающего воздействия.

Математическая модель компенсационной связи  $K_C(p)$  (рис. 4.1 б) по возмущающему воздействию  $\Delta\omega_C$  изображена на рис. 4.2.

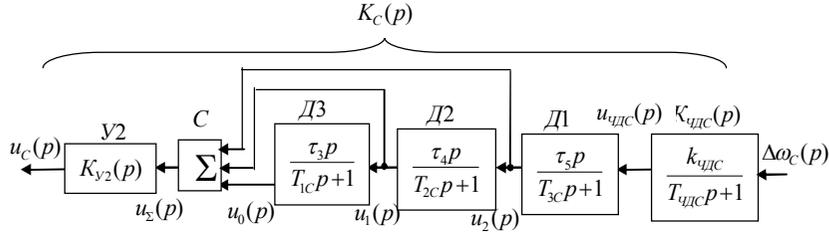


Рис. 4.2. Математическая модель компенсационной связи  $K_C(p)$ , с помощью которой формируются три производных возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C$

С элемента сравнения частотного дискриминатора отклонение частоты  $\Delta\omega_C$  входного напряжения от номинального значения через преобразователь частотного дискриминатора с передаточной функцией  $k_{чдс} / (T_{чдс} p + 1)$  в виде напряжения

$$u_{чдс}(p) = [k_{чдс} / (T_{чдс} p + 1)] \Delta\omega_C(p),$$

являющегося функцией возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(p)$ , поступает на первое дифференцирующее звено Д1 с передаточной функцией  $\tau_5 p / (T_{3c} p + 1)$ . Выходное напряжение  $u_2(p)$  звена, являющегося функцией первой производной возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(p)$ , поступает на второе дифференцирующее звено Д2 с передаточной функцией  $\tau_4 p / (T_{2c} p + 1)$  и на сумматор  $\Sigma$ . Напряжение  $u_1(p)$  с выхода звена Д2, являющегося функцией второй производной возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(p)$ , подается на третье дифференцирующее звено Д3 с передаточной функцией  $\tau_3 p / (T_{1c} p + 1)$  и на сумматор  $\Sigma$ . Напряжение  $u_0(p)$ , являющееся функцией третьей производной возмущающего воздействия

$\Delta\omega_C(p)$ , с выхода звена Д3 поступает на сумматор  $\Sigma$ . Таким образом, напряжение  $u_\Sigma(p)$  на выходе сумматора  $\Sigma$  представляет сумму напряжений, являющихся функциями первой, второй и третьей производных возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(p)$ :

$$u_\Sigma(p) = u_2(p) + u_1(p) + u_0(p), \quad (4.10)$$

где

$$\left. \begin{aligned} u_2(p) &= \frac{\tau_5 p}{T_{3c} p + 1} u_{чдс}(p) = \frac{\tau_5 k_{чдс} p}{(T_{3c} p + 1)(T_{чдс} p + 1)} \Delta\omega_C(p); \\ u_1(p) &= \frac{\tau_4 p}{T_{2c} p + 1} u_2(p) = \frac{\tau_4 \tau_5 k_{чдс} p^2}{(T_{2c} p + 1)(T_{3c} p + 1)(T_{чдс} p + 1)} \Delta\omega_C(p); \\ u_0(p) &= \frac{\tau_3 p}{T_{1c} p + 1} u_1(p) = \frac{\tau_3 \tau_4 \tau_5 k_{чдс} p^3}{(T_{1c} p + 1)(T_{2c} p + 1)(T_{3c} p + 1)(T_{чдс} p + 1)} \Delta\omega_C(p). \end{aligned} \right\} (4.11)$$

Подставляя в (4.10) значения  $u_i(p)$  из (4.11), получаем

$$\begin{aligned} u_\Sigma(p) &= \frac{[\tau_3 \tau_4 \tau_5 k_{чдс} p^3 + \tau_4 \tau_5 k_{чдс} (T_{1c} p + 1) p^2 + \tau_5 k_{чдс} (T_{1c} p + 1)(T_{2c} p + 1) p]}{(T_{1c} p + 1)(T_{2c} p + 1)(T_{3c} p + 1)(T_{чдс} p + 1)} \times \\ &\quad [\tau_3 \tau_4 \tau_5 k_{чдс} p^3 + \tau_4 \tau_5 k_{чдс} T_{1c} p^3 + \tau_4 \tau_5 k_{чдс} p^2 + \tau_5 k_{чдс} T_{1c} T_{2c} p^3 + \\ &\quad + \tau_5 k_{чдс} (T_{1c} + T_{2c}) p^2 + \tau_5 k_{чдс} p] \times \\ &\quad \Delta\omega_C(p) = \frac{\{(\tau_3 \tau_4 \tau_5 k_{чдс} + \tau_4 \tau_5 k_{чдс} T_{1c} + \tau_5 k_{чдс} T_{1c} T_{2c}) p^3 + \\ &\quad + [\tau_4 \tau_5 k_{чдс} + \tau_5 k_{чдс} (T_{1c} + T_{2c})] p^2 + \tau_5 k_{чдс} p\}}{(T_{1c} p + 1)(T_{2c} p + 1)(T_{3c} p + 1)(T_{чдс} p + 1)} \Delta\omega_C(p), \end{aligned}$$

или

$$u_\Sigma(p) = \left[ \frac{\tau_5 k_{чдс} p}{(T_{3c} p + 1)(T_{чдс} p + 1)} + \frac{\tau_4 \tau_5 k_{чдс} p^2}{(T_{2c} p + 1)(T_{3c} p + 1)(T_{чдс} p + 1)} + \frac{\tau_3 \tau_4 \tau_5 k_{чдс} p^3}{(T_{1c} p + 1)(T_{2c} p + 1)(T_{3c} p + 1)(T_{чдс} p + 1)} \right] \Delta\omega_C(p),$$

или

$$u_{\Sigma}(p) = \frac{\tau_0 p^3 + \tau_1 p^2 + \tau_2 p}{(T_{1C} p + 1)(T_{2C} p + 1)(T_{3C} p + 1)(T_{4DC} p + 1)} \Delta \omega_C(p), \quad (4.12)$$

где

$$\tau_2 = \tau_5 k_{4DC};$$

$$\tau_1 = \tau_4 \tau_5 k_{4DC} + \tau_5 k_{4DC} (T_{1C} + T_{2C});$$

$$\tau_0 = \tau_3 \tau_4 \tau_5 k_{4DC} + \tau_4 \tau_5 k_{4DC} T_{1C} + \tau_5 k_{4DC} T_{1C} T_{2C}.$$

Напряжение  $u_{\Sigma}(p)$  с выхода сумматора  $\Sigma$  (рис. 4.2) поступает на усилитель У2 с передаточной функцией  $K_{y2}(p) = k_{y2}$ . Напряжение  $u_C(p)$  на выходе У2, являющееся выходным напряжением компенсационной связи по возмущающему воздействию, равно

$$u_C(p) = k_{y2} u_{\Sigma}(p) = \frac{k_{y2} (\tau_0 p^3 + \tau_1 p^2 + \tau_2 p)}{(T_{1C} p + 1)(T_{2C} p + 1)(T_{3C} p + 1)(T_{4DC} p + 1)} \Delta \omega_C(p). \quad (4.13)$$

В соответствии с (4.13) передаточная функция связи по возмущающему воздействию равна

$$K_C(p) = \frac{u_C(p)}{\Delta \omega_C(p)} = \frac{k_{y2} (\tau_0 p^3 + \tau_1 p^2 + \tau_2 p)}{(T_{1C} p + 1)(T_{2C} p + 1)(T_{3C} p + 1)(T_{4DC} p + 1)} = \frac{D_C(p)}{F_C(p)}. \quad (4.14)$$

Математическая модель комбинированной ЧАП (рис. 4.1 б) при подстановке значения (4.1) передаточной функции  $K_C(p)$  из (4.14) изображена на рис. 4.3.

Передаточную функцию по ошибке  $K_{\Delta \omega_{np}}(p)$  комбинированной системы ЧАП (рис. 4.1) с учетом передаточной функции  $K_C(p) = D_C(p)/F_C(p)$  связи по возмущающему воздействию (4.14), соответствующей условиям повышения порядка астатизма и компенсации пары комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения, получим, если в выражение (4.6)

$$K_{\Delta \omega_{np}}(p) = \frac{\Delta \omega_{np}(p)}{\Delta \omega_C(p)} = \frac{[F_C(p)(T_{\Gamma} p + 1)p - D_C(p)k_{y1}k_{II}k_{\Gamma}](T_{4Д} p + 1)}{[(T_{4Д} p + 1)p(T_{\Gamma} p + 1) + k_{y1}k_{II}k_{\Gamma}k_{4Д}]F_C(p)} \quad (4.15)$$

подставим значения полиномов  $D_C(p)$  и  $F_C(p)$  из (4.14) и значения передаточных функций элементов системы [см. (4.1)]:

$$K_{\Delta \omega_{np}}(p) = \frac{\Delta \omega_{np}(p)}{\Delta \omega_C(p)} = \frac{[(T_{1C} p + 1)(T_{2C} p + 1)(T_{3C} p + 1)(T_{4DC} p + 1)(T_{\Gamma} p + 1)p - (\tau_0 p^3 + \tau_1 p^2 + \tau_2 p)k_{y2}k_{y1}k_{II}k_{\Gamma}]}{[(T_{4Д} p + 1)p(T_{\Gamma} p + 1) + k_{y1}k_{II}k_{\Gamma}k_{4Д}]} \times \frac{(T_{4Д} p + 1)}{(T_{1C} p + 1)(T_{2C} p + 1)(T_{3C} p + 1)(T_{4DC} p + 1)} = \frac{D_{\Delta \omega_{np}}(p)}{F_{\Delta \omega_{np}}(p)}.$$

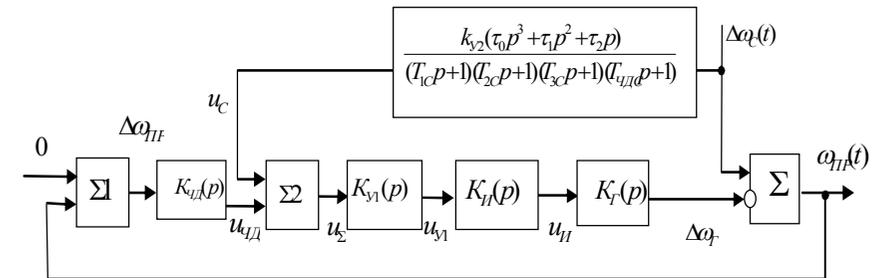


Рис. 4.3. Математическая модель комбинированной системы ЧАП с астатизмом второго порядка и компенсацией комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения в отклонениях

Учитывая, что  $T_{4Д} = T_{4DC}$ , выражение для  $K_{\Delta \omega_{np}}(p)$  принимает вид

$$K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p) = \frac{\Delta\omega_{\text{ПР}}(p)}{\Delta\omega_C(p)} = \frac{[(T_{1C}p+1)(T_{2C}p+1)(T_{3C}p+1)(T_{\text{чд}}p+1)(T_{\Gamma}p+1)p - (\tau_0 p^3 + \tau_1 p^2 + \tau_2 p)k_{\text{Y2}}k_{\text{Y1}}k_{\text{И}}k_{\Gamma}]}{[(T_{\text{чд}}p+1)p(T_{\Gamma}p+1) + k_{\text{Y1}}k_{\text{И}}k_{\Gamma}k_{\text{чд}}](T_{1C}p+1)(T_{2C}p+1)(T_{3C}p+1)} = (4.16)$$

$$= \frac{D_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p)}{F_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p)},$$

или

$$K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p) = \frac{\Delta\omega_{\text{ПР}}(p)}{\Delta\omega_C(p)} = \frac{a_0 p^6 + a_1 p^5 + a_2 p^4 + a_3 p^3 + a_4 p^2 + a_5 p}{b_0 p^6 + b_1 p^5 + b_2 p^4 + b_3 p^3 + b_4 p^2 + b_5 p + b_6} = \frac{D_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p)}{F_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p)}, \quad (4.17)$$

где

$$a_0 = T_{1C}T_{2C}T_{3C}T_{\Gamma}T_{\text{чд}};$$

$$a_1 = T_{1C}T_{2C}T_{3C}(T_{\Gamma} + T_{\text{чд}}) + (T_{1C}T_{2C} + T_{1C}T_{3C} + T_{2C}T_{3C})T_{\Gamma}T_{\text{чд}};$$

$$a_2 = (T_{1C}T_{2C} + T_{2C}T_{3C} + T_{1C}T_{3C})(T_{\Gamma} + T_{\text{чд}}) + T_{1C}T_{2C}T_{3C} + T_{\Gamma}T_{\text{чд}}(T_{1C} + T_{2C} + T_{3C});$$

$$a_3 = T_{3C}T_{\Gamma} + T_{2C}T_{3C} + T_{1C}T_{\text{чд}} + T_{2C}T_{\text{чд}} + T_{1C}T_{3C} + T_{\Gamma}T_{\text{чд}} + T_{1C}T_{2C} + T_{3C}T_{\text{чд}} + T_{1C}T_{\Gamma} + T_{2C}T_{\Gamma} - k_{\text{Y2}}k_{\text{Y1}}k_{\text{И}}k_{\Gamma}\tau_0;$$

$$a_4 = T_{\text{чд}} + T_{2C} + T_{3C} + T_{1C} + T_{\Gamma} - k_{\text{Y2}}k_{\text{Y1}}k_{\text{И}}k_{\Gamma}\tau_1;$$

$$a_5 = 1 - k_{\text{Y2}}k_{\text{Y1}}k_{\text{И}}k_{\Gamma}\tau_2;$$

$$b_0 = T_{1C}T_{2C}T_{3C}T_{\Gamma}T_{\text{чд}};$$

$$b_1 = T_{\Gamma}T_{\text{чд}}(T_{1C}T_{2C} + T_{2C}T_{3C} + T_{2C}T_{1C}) + (T_{\Gamma} + T_{\text{чд}})T_{1C}T_{2C}T_{3C};$$

$$b_2 = T_{\Gamma}T_{\text{чд}}(T_{2C} + T_{3C} + T_{1C}) + (T_{\Gamma} + T_{\text{чд}})(T_{3C}T_{1C} + T_{2C}T_{3C} + T_{1C}T_{2C}) + T_{2C}T_{3C}T_{1C};$$

$$b_3 = k_P T_{1C}T_{2C}T_{3C} + T_{1C}T_{2C} + T_{2C}T_{3C} + T_{1C}T_{3C} + T_{\Gamma}T_{1C} + T_{\Gamma}T_{2C} + T_{\Gamma}T_{3C} + T_{\text{чд}}T_{1C} + T_{\text{чд}}T_{2C} + T_{\text{чд}}T_{3C} + T_{\Gamma}T_{\text{чд}};$$

$$b_4 = k_P(T_{1C}T_{2C} + T_{1C}T_{3C} + T_{2C}T_{3C}) + T_{3C} + T_{1C} + T_{2C} + T_{\Gamma} + T_{\text{чд}};$$

$$b_5 = k_P(T_{1C} + T_{2C} + T_{3C}) + 1; \quad b_6 = k_P; \quad k_P = k_{\text{чд}}k_{\text{Y1}}k_{\text{И}}k_{\Gamma}.$$

#### 4.2.2. Выбор постоянных времени $T_{1C}$ , $T_{2C}$ и $T_{3C}$ передаточной функции $K_C(p)$ связи по возмущающему воздействию

Из формулы (4.16) видно, что постоянные времени  $T_{1C}$ ,  $T_{2C}$  и  $T_{3C}$  передаточной функции  $K_C(p)$  (4.14) связи по возмущающему воздействию не входят в характеристическое уравнение замкнутой части системы

$$F_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p) = (T_{\text{чд}}p + 1)(T_{\Gamma}p + 1)p + k_P = 0,$$

где  $k_P = k_{\text{чд}}k_{\text{Y1}}k_{\text{И}}k_{\Gamma}$  – коэффициент усиления разомкнутой системы, поэтому не влияют на ее устойчивость. Однако из-за них возникают новые корни в характеристическом уравнении комбинированной системы, равные  $p_{1C} = -1/T_{1C}$ ;  $p_{2C} = -1/T_{2C}$ ;  $p_{3C} = -1/T_{3C}$ .

Корни характеристического уравнения замкнутой части системы (3.6) равны

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= -4,479265 + j13,375354 = \alpha + j\omega; \\ \alpha &= -4,479265; \quad \omega = 13,375354; \\ p_2 &= -4,479265 - j13,375354 = \alpha - j\omega; \\ p_3 &= -201,041469. \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

Чтобы новые компоненты переходной составляющей ошибки  $A_{1C}e^{p_{1C}t}$ ,  $A_{2C}e^{p_{2C}t}$ ,  $A_{3C}e^{p_{3C}t}$  затухали быстрее, чем медленно затухающая компонента замкнутой системы, соответствующая паре комплексно-сопряженных корней, каждый из вносимых корней по

абсолютной величине должен быть больше вещественных частей комплексно-сопряженных корней  $\alpha$ . В соответствии с этим требованием выбираем

$$\left. \begin{aligned} p_{1C} &= 7\alpha = 7(-4,479265) = -31,354855; \\ p_{2C} &= 10\alpha = 10(-4,479265) = -44,79265; \\ p_{3C} &= 15\alpha = 15(-4,479265) = -67,188976, \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} T_{1C} &= |1/p_{1C}| = 1/31,354855 = 0,031893; \\ T_{2C} &= |1/p_{2C}| = 1/44,79265 = 0,0223251; \\ T_{3C} &= |1/p_{3C}| = 1/67,188976 = 0,014883. \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

#### 4.2.3. Определение коэффициента $\tau_2$ при первой производной возмущающего воздействия в соответствии с условием повышения порядка астатизма системы

При произвольном значении коэффициента  $\tau_2$ , согласно (4.17), комбинированная система, также как и система ЧАП с принципом управления по отклонению (3.6), имеет астатизм первого порядка.

Условием повышения порядка астатизма комбинированной системы ЧАП с первого до второго является выражение

$$a_5 = 1 - k_{y1}k_{y2}k_{II}k_{\Gamma}\tau_2 = 0, \quad (4.21)$$

откуда значение  $\tau_2$  равно

$$\tau_2 = \frac{1}{k_{y1}k_{y2}k_{II}k_{\Gamma}} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ с}. \quad (4.22)$$

При выполнении условия повышения порядка астатизма (4.21) и выбранных значениях постоянных времени  $T_{1C}$ ,  $T_{2C}$  и  $T_{3C}$  (4.20) передаточная функция комбинированной системы по ошибке  $K_{\Delta\omega_{\text{пр}}}(p)$  (4.16), (4.17) принимает вид

$$\begin{aligned} K_{\Delta\omega_{\text{пр}}}(p) &= \frac{\Delta\omega_{\text{пр}}(p)}{\Delta\omega_C(p)} = \\ &= \frac{a_0p^6 + a_1p^5 + a_2p^4 + a_3p^3 + a_4p^2}{b_0p^6 + b_1p^5 + b_2p^4 + b_3p^3 + b_4p^2 + b_5p + b_6} = \frac{D_{\Delta\omega_{\text{пр}}}(p)}{F_{\Delta\omega_{\text{пр}}}(p)}, \quad (4.23) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= 5,277094831 \cdot 10^{-9}; \quad a_1 = 1,8660345 \cdot 10^{-6}; \quad a_2 = 2,042221172 \cdot 10^{-4}; \\ a_3 &= 0,0092650048 - 20\tau_0; \quad a_4 = 0,1740411 - 20\tau_1; \\ b_0 &= 5,277094831 \cdot 10^{-9}; \quad b_1 = 1,8660345 \cdot 10^{-6}; \\ b_2 &= 2,042221172 \cdot 10^{-4}; \quad b_3 = 0,0094760886; \\ b_4 &= 0,204354886; \quad b_5 = 2,380822; \quad b_6 = 20, \end{aligned}$$

т.е. система становится системой с астатизмом второго порядка.

#### 4.2.4. Определение коэффициентов $\tau_1$ и $\tau_0$ при второй и третьей производных возмущающего воздействия в соответствии с условием повышения быстродействия системы ЧАП

Как отмечалось, повышения быстродействия системы можно добиться путем компенсации медленно затухающей компоненты (кривая 1 на рис. 3.4) переходного процесса, соответствующей паре комплексно-сопряженных корней  $p_{1,2} = -4,479265 \pm j13,375354$  ( $p_{1,2} = \alpha \pm j\omega$ ) характеристического уравнения замкнутой части системы. Компенсировать ее можно путем компенсации соответствующей пары ( $p_1, p_2$ ) комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения подачи в систему ЧАП второй и третьей производных возмущающего воздействия с помощью разомкнутой связи. Значения коэффициентов  $\tau_1$  при второй и  $\tau_0$  при третьей производных задающего воздействия, входящих в передаточную функцию  $K_C(p)$  [см. (4.14) и рис. 4.3], определим в соответствии с условием повышения быстродействия системы – компенсации комплексно-сопряженных корней  $p_1$  и  $p_2$  характеристического уравнения.

Для решения поставленной задачи принимаем следующий порядок расчета.

1. Разбиваем характеристический полином  $F_{\Delta\omega_{np}}(p)$  замкнутой части системы (4.16) на два сомножителя в соответствии с его корнями  $p_1, p_2$  и  $p_3$ :

$$\begin{aligned} F_{\Delta\omega_{np}}(p) &= (T_{цд}p + 1)(T_{г}p + 1)p + k_{цд}k_{y1}k_{н}k_{г} = \\ &= T_{цд}T_{г}(p^3 + \frac{T_{цд} + T_{г}}{T_{цд}T_{г}}p^2 + \frac{1}{T_{цд}T_{г}}p + \frac{k_p}{T_{цд}T_{г}}) = \\ &= T_{цд}T_{г}(p - p_1)(p - p_2)(p - p_3) = T_{цд}T_{г}F_{01}(p)F_{02}(p), \end{aligned} \quad (4.24)$$

где

$$\begin{aligned} F_{01}(p) &= (p - p_1)(p - p_2) = (p + \alpha - j\omega)(p + \alpha + j\omega) = p^2 + 2\alpha p + \alpha^2 + \omega^2 = \\ &= p^2 - 2(-4,479265)p + (-4,479265)^2 + 13,375354^2 = \\ &= p^2 + 8,958530178p + 198,963925381; \\ F_{02}(p) &= (p - p_3) = p + 201,041469. \end{aligned}$$

Один из сомножителей  $F_{01}(p)$  содержит комплексно-сопряженные корни  $p_1$  и  $p_2$ , которые необходимо компенсировать.

2. Учитывая (4.24), записываем передаточную функцию комбинированной системы (4.16) в следующей форме:

$$K_{\Delta\omega_{np}}(p) = \frac{M_0(p)}{T_{г}T_{цд}F_{01}(p)F_{02}(p)F_C(p)}, \quad (4.25)$$

где при учете выражения (4.23)

$$\begin{aligned} M_0 &= (T_{1C}p + 1)(T_{2C}p + 1)(T_{3C}p + 1)(T_{цдC}p + 1)(T_{г}p + 1)p - \\ &- (\tau_0p^3 + \tau_1p^2 + \tau_2p)k_{y2}k_{y1}k_{н}k_{г} = a_0p^6 + a_1p^5 + a_2p^4 + a_3p^3 + a_4p^2; \\ a_0 &= T_{1C}T_{2C}T_{3C}T_{г}T_{цдC} = 5,277094831 \cdot 10^{-9}; \\ a_1 &= T_{1C}T_{2C}T_{3C}(T_{г} + T_{цдC}) + (T_{1C}T_{2C} + T_{1C}T_{3C} + T_{2C}T_{3C})T_{г}T_{цдC} = \\ &= 1,8660345 \cdot 10^{-6}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2 &= (T_{1C}T_{2C} + T_{2C}T_{3C} + T_{1C}T_{3C})(T_{г} + T_{цдC}) + \\ &+ T_{1C}T_{2C}T_{3C} + T_{г}T_{цдC}(T_{1C} + T_{2C} + T_{3C}) = 2,042221172 \cdot 10^{-4}; \\ a_3 &= T_{3C}T_{г} + T_{2C}T_{3C} + T_{1C}T_{цд} + T_{2C}T_{цд} + T_{1C}T_{3C} + \\ &+ T_{г}T_{цд} + T_{1C}T_{2C} + T_{3C}T_{цд} + T_{1C}T_{г} + T_{2C}T_{г} - k_{y2}k_{y1}k_{н}k_{г}\tau_0 = \\ &= 0,0092650048 - 20\tau_0; \\ a_4 &= T_{цд} + T_{2C} + T_{3C} + T_{1C} + T_{г} - k_{y2}k_{y1}k_{н}k_{г}\tau_1 = 0,1740411 - 20\tau_1; \\ F_C(p) &= (T_{1C}p + 1)(T_{2C}p + 1)(T_{3C}p + 1); \\ F_{01}(p) &= p^2 + 2\alpha p + \alpha^2 + \omega^2; \quad F_{02}(p) = p + 201,041469. \end{aligned}$$

Поскольку в полином  $M_0$  входит полином  $D_C = \tau_0p^3 + \tau_1p^2 + \tau_2p$  передаточной функции  $K_C(p)$  связи по возмущающему воздействию, не влияющей на устойчивость замкнутой части системы, то, выбирая параметры этого полинома, можно компенсировать комплексно-сопряженные корни характеристического полинома  $F_{01}(p)$ . При этом передаточная функция (4.25) принимает вид

$$K_{\Delta\omega_{np}}(p) = \frac{M_0(p)M_{02}(p)}{T_{г}T_{цд}F_{01}(p)F_{02}(p)F_C(p)}. \quad (4.26)$$

Условием компенсации корней полинома  $F_{01}(p)$  является равенство полиномов

$$F_{01}(p) = M_{01}(p).$$

В результате деления полинома  $M_0(p)$  на  $F_{01}(p)$  получаем полином  $M_{02}(p)$  и остаток:

$$\begin{aligned} \frac{M_0(p)}{F_{01}(p)} &= \frac{a_0p^6 + a_1p^5 + a_2p^4 + a_3p^3 + a_4p^2}{p^2 + 8,95853p + 198,963925} = \frac{(a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p + a_4)p^2}{p^2 + 8,95853p + 198,963925} = \\ &= \frac{[5,277094831 \cdot 10^{-9}p^4 + 1,8660345 \cdot 10^{-6}p^3 + \\ &+ 2,042221172 \cdot 10^{-4}p^2 + (0,0092650048 - 20\tau_0)p + (0,1740411 - 20\tau_1)]p^2}{p^2 + 8,95853p + 198,963925} \end{aligned}$$

$$\frac{M_0(p)}{F_{01}(p)} = 5,277094831 \cdot 10^{-9} p^4 + 1,81875955 \cdot 10^{-6} p^3 + 1,869420788 \cdot 10^{-4} p^2 + \frac{(0,00722898 - 20 \tau_{00})p + (0,13685897 - 20 \tau_{11})}{p^2 + 8,95853p + 198,963925} p^2 = M_{02}(p) + \text{остаток},$$

где

$$M_{02}(p) = (5,277094831 \cdot 10^{-9} p^4 + 1,81875955 \cdot 10^{-6} p^3 + 1,869420788 \cdot 10^{-4} p^2);$$

$$\text{остаток} = \frac{(0,00722898 - 20 \tau_0)p + (0,13685897 - 20 \tau_1)}{p^2 + 8,95853p + 198,963925} p^2.$$

Чтобы остаток был равен нулю, следует выполнить условия

$$\left. \begin{aligned} 0,00722898 - 20 \tau_0 &= 0; \\ 0,13685897 - 20 \tau_1 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4.27)$$

откуда найти значения искомым коэффициентов передаточной функции  $K_C(p)$  (4.14):

$$\tau_0 = 3,61448915 \cdot 10^{-4}; \quad \tau_1 = 0,00684285. \quad (4.28)$$

Подставив в формулу (4.26) значения параметров, получим передаточную функцию комбинированной системы ЧАП:

$$K_{\Delta\omega_{np}}(p) = \frac{\Delta\omega_{np}(p)}{\Delta\omega_C(p)} = \frac{M_{02}(p)}{T_T T_{уд} F_{02}(p) F_C(p)} =$$

$$= \frac{5,277094831 \cdot 10^{-9} p^4 + 1,81875955 \cdot 10^{-6} p^3 + 1,869420788 \cdot 10^{-4} p^2}{T_T T_{уд} (p - p_3)(T_{1C} p + 1)(T_{2C} p + 1)(T_{3C} p + 1)} =$$

$$= \frac{5,277094831 \cdot 10^{-9} p^4 + 1,81875955 \cdot 10^{-6} p^3 + 1,869420788 \cdot 10^{-4} p^2}{0,005 \cdot 0,1(p + 201,041469)(0,031893p + 1)(0,022325p + 1)(0,014883p + 1)} =$$

$$= \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2}{b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p + b_4} = \frac{D_{\theta\alpha K}(p)}{F_{\theta\alpha K}(p)}, \quad (4.29)$$

где

$$a_0 = 5,277094831 \cdot 10^{-9}; \quad a_1 = 1,81875955 \cdot 10^{-6}; \quad a_2 = 1,869420788 \cdot 10^{-4};$$

$$b_0 = 5,277094831 \cdot 10^{-9}; \quad b_1 = 1,81875955 \cdot 10^{-6}; \quad b_2 = 1,86878752 \cdot 10^{-4};$$

$$b_3 = 0,007440062; \quad b_4 = 0,1005207349.$$

3. Корни характеристического уравнения комбинированной системы

$$F_{\Delta\omega_{np}}(p) = b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p + b_4 = 0$$

равны

$$p_3 = -201,041469; \quad p_{1C} = -31,354855; \quad (4.29 \text{ а})$$

$$p_{2C} = -44,79265; \quad p_{3C} = -67,188976.$$

Таким образом, выполнен синтез передаточной функции связи по возмущающему воздействию  $\Delta\omega_C(t)$  комбинированной системы ЧАП в соответствии с условием повышения динамической точности – увеличением порядка астатизма системы относительно возмущающего воздействия с первого до второго и условием повышения быстродействия – компенсацией пары комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения, соответствующих медленно затухающей компоненте переходного процесса.

Повышение порядка астатизма системы достигнуто благодаря подаче в систему с помощью разомкнутой связи первой производной задающего воздействия, а компенсация пары комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения – в результате подачи в систему второй и третьей производных возмущающего воздействия.

### 4.3. Показатели качества комбинированной системы ЧАП с астатизмом второго порядка и повышенным быстродействием

Определены динамические, среднеквадратические ошибки и показатели качества переходных процессов комбинированной системы частотной автоподстройки (ЧАП), разомкнутая связь по возмущающему воздействию которой синтезирована в соответствии с

условием повышения порядка астатизма с первого до второго и компенсации комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения системы.

#### 4.3.1. Динамические ошибки комбинированной системы ЧАП с астатизмом второго порядка

Передаточная функция по ошибке  $K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p)$  комбинированной системы ЧАП, компенсационная связь по возмущению которой синтезирована в соответствии с условиями повышения динамической точности (повышения порядка астатизма относительно задающего воздействия с первого до второго) и быстрогодействия (компенсации медленно затухающей компоненты переходного процесса, соответствующей комплексно-сопряженным корням характеристического уравнения) определяется выражением (4.29):

$$\begin{aligned} K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p) &= \frac{\Delta\omega_{\text{ПР}}(p)}{\Delta\omega_C(p)} = \frac{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2}{b_0p^4 + b_1p^3 + b_2p^2 + b_3p + b_4} = \\ &= \frac{D_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p)}{F_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p)}, \end{aligned} \quad (4.30)$$

где  $a_0 = 5,277094831 \cdot 10^{-9}$ ;  $a_1 = 1,81875955 \cdot 10^{-6}$ ;  $a_2 = 1,869420788 \cdot 10^{-4}$ ;  
 $b_0 = 5,277094831 \cdot 10^{-9}$ ;  $b_1 = 1,81875955 \cdot 10^{-6}$ ;  $b_2 = 1,86878752 \cdot 10^{-4}$ ;  
 $b_3 = 0,0074440062$ ;  $b_4 = 0,1005207349$ .

Определим динамические ошибки комбинированной системы ЧАП при ступенчатом, линейном и квадратичном законах изменения возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(t)$ :

$$\Delta\omega_C(t) = \omega_{0C}; \quad \Delta\omega_C(t) = \alpha_1 t; \quad \Delta\omega_C(t) = \alpha_2 t^2.$$

Изображение ошибки комбинированной системы в соответствии с (4.30) определяется выражением

$$\Delta\omega_{\text{ПР}}(p) = K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p)\Delta\omega_C(p). \quad (4.31)$$

Установившаяся динамическая ошибка  $\Delta\omega_{\text{ПРК}}(p)$  комбинированной системы в соответствии с теоремой операционного исчисления о конечном значении функции равна [26]

$$\Delta\omega_{\text{ПР}}(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \Delta\omega_{\text{ПРК}}(p) \quad (4.32)$$

или, подставляя в (4.32) значение  $\Delta\omega_{\text{ПРК}}(p)$  из (4.31),

$$\Delta\omega_{\text{ПР}}(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p)\Delta\omega_{\text{ПРК}}(p). \quad (4.33)$$

При изменении возмущающего воздействия по закону ступенчатой функции  $\Delta\omega_C(t) = \omega_{C0}$  получим установившуюся ошибку, если в формулу (4.33) подставим изображение возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(p) = L[\omega_{C0}] = \omega_{C0}/p$  и значение передаточной функции системы по ошибке из (4.30):

$$\Delta\omega_{\text{ПР}}(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2}{b_0p^4 + b_1p^3 + b_2p^2 + b_3p + b_4} \frac{\omega_{C0}}{p} = 0, \quad (4.34)$$

т.е. в комбинированной системе ЧАП с астатизмом второго порядка, как и в системе с принципом управления по отклонению (3.13) и комбинированной системе (2.27), имеющих астатизм первого порядка, при изменении возмущающего воздействия по закону ступенчатой функции установившаяся ошибка равна нулю.

Если возмущающее воздействие изменяется по линейному закону  $\Delta\omega_C(t) = \alpha_1 t$ , то ошибку в установившемся режиме получим, подставив в (4.33) изображение возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(p) = \alpha_1/p^2$ :

$$\Delta\omega_{\text{ПР}}(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2}{b_0p^4 + b_1p^3 + b_2p^2 + b_3p + b_4} \frac{\alpha_1}{p^2} = 0, \quad (4.35)$$

т.е. вместо конечной ошибки в системах с астатизмом первого порядка [выражения (2.28), (3.14)] в комбинированной системе с астатизмом второго порядка скоростная ошибка равна нулю.

При изменении возмущающего воздействия по квадратичному закону  $\Delta\omega_C(t) = \alpha_2 t^2$ , изображение которого  $\Delta\omega_C(p) = 2!\alpha_2/p^3$ , ошибка в установившемся режиме равна

$$\Delta\omega_{\text{ПР}}(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2}{b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p + b_4} \frac{2!\alpha_2}{p^3} = \frac{a_2}{b_4} 2!\alpha_2, \quad (4.36)$$

т.е. если в системах с астатизмом первого порядка ошибка в установившемся режиме стремится к бесконечности [выражения (2.30), (3.15)], в комбинированной системе ЧАП с астатизмом второго порядка она ограничена конечным значением.

Согласно (4.30)  $a_2 = 1,869420788 \cdot 10^{-4}$ ;  $b_4 = 0,1005207349$ , поэтому

$$\Delta\omega_{\text{ПР}} = \frac{1,869420788 \cdot 10^{-4}}{0,1005207349} 2!\alpha_2.$$

Если  $\Delta\alpha_2 = 10 \text{ рад/с}^3$ , то

$$\Delta\omega_{\text{ПР}} = \frac{1,869420788 \cdot 10^{-4}}{0,1005207349} 2! \cdot 10 = 0,03718 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (4.37)$$

### 4.3.2. Среднеквадратическая ошибка комбинированной системы ЧАП

Как и при определении СКО систем ЧАП с астатизмом первого порядка (3.19), спектральную плотность возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(t)$  для комбинированной системы с астатизмом второго порядка примем равной:

$$S_C(\omega) = \frac{1}{s^2 + \beta^2}, \quad \beta = 1.$$

Спектральная плотность ошибки комбинированной системы

$$S_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(\omega) = |K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(j\omega)|^2 S_C(\omega), \quad (4.38)$$

где  $K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(j\omega) = K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(p)|_{p=j\omega}$  – комплексная передаточная функция комбинированной системы.

Подставив в (4.38)  $K_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(j\omega)$  из (4.30) при  $p = j\omega$  и значение  $S_C(\omega)$ , получим спектральную плотность ошибки комбинированной системы:

$$S_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(\omega) = \left| \frac{a_0(j\omega)^4 + a_1(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2}{b_0(j\omega)^4 + b_1(j\omega)^3 + b_2(j\omega)^2 + b_3 j\omega + b_4} \right|^2 \frac{1}{\omega^2 + \beta^2}. \quad (4.39)$$

Среднее значение квадрата ошибки [4, 20]

$$\begin{aligned} \overline{\Delta\omega_{\text{ПР}}^2} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta\omega_{\text{ПР}}}(\omega) d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{a_0(j\omega)^4 + a_1(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2}{b_0(j\omega)^4 + b_1(j\omega)^3 + b_2(j\omega)^2 + b_3 j\omega + b_4} \right|^2 \frac{1}{\omega^2 + \beta^2} d\omega = I_5, \quad (4.40) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= 5,277094831 \cdot 10^{-9}; & a_1 &= 1,81875955 \cdot 10^{-6}; & a_2 &= 1,869420788 \cdot 10^{-4}; \\ b_0 &= 5,277094831 \cdot 10^{-9}; & b_1 &= 1,81875955 \cdot 10^{-6}; & b_2 &= 1,086878752; \\ b_3 &= 0,007440062; & b_4 &= 0,1005207349; & \beta &= 1. \end{aligned}$$

Приведем интеграл (4.40) к табличному виду:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta\omega_{\text{ПР}}^2} &= \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d_0(j\omega)^8 + d_1(j\omega)^6 + d_2(j\omega)^4 + d_3(j\omega)^2 + d_4}{|c_0(j\omega)^5 + c_1(j\omega)^4 + c_2(j\omega)^3 + c_3(j\omega)^2 + c_4 j\omega + c_5|^2} d\omega = I_5, \quad (4.41) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} d_0 &= a_0^2 = 2,7847721286 \cdot 10^{-17}; & d_1 &= -(a_1^2 - 2a_0 a_2) = -1,335532 \cdot 10^{-12}; \\ d_2 &= a_2^2 = 3,492366 \cdot 10^{-8}; & d_3 &= 0; & d_4 &= 0; \\ c_0 &= b_0 = 5,2770948 \cdot 10^{-9}; & c_1 &= b_1 + b_0 \beta = 1,8240366 \cdot 10^{-6}; \\ c_2 &= b_2 + b_1 \beta = 1,886975 \cdot 10^{-4}; & c_3 &= b_3 + b_2 \beta = 0,00762694; \\ c_4 &= b_4 + b_3 \beta = 0,107961; & c_5 &= b_4 \beta = 0,100521. \end{aligned}$$

Значение табличного интеграла [20] запишем в виде

$$I_5 = \frac{(-1)^{5-1} M_5}{2c_0 \Delta_5} = \overline{\Delta \omega_{\text{ПР}}^2}, \quad (4.42)$$

где

$$M_5 = \begin{vmatrix} d_0 & d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ c_0 & c_2 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & c_3 & c_5 & 0 \\ 0 & c_0 & c_2 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & c_0 & c_3 & c_5 \end{vmatrix} = 4,573769 \cdot 10^{-24},$$

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} c_1 & c_3 & c_5 & 0 & 0 \\ c_0 & c_2 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & c_3 & c_5 & 0 \\ 0 & c_0 & c_2 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & c_0 & c_3 & c_5 \end{vmatrix} = 2,0700653 \cdot 10^{-14}.$$

Подставив в (4.41) значения  $M_5$ ,  $\Delta_5$  и  $c_0$ , получим среднее значение квадрата ошибки:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta \omega_{\text{ПР}}^2} = I_5 &= \frac{(-1)^{5-1} M_5}{2c_0 \Delta_5} = \\ &= \frac{4,573769 \cdot 10^{-24}}{2 \cdot 5,2770948 \cdot 10^{-9} \cdot 2,0700653 \cdot 10^{-14}} = 0,0209346. \end{aligned} \quad (4.43)$$

СКО комбинированной системы ЧАП

$$\varepsilon_K = \sqrt{\overline{\Delta \omega_{\text{ПР}}^2}} = \sqrt{0,0209346} = 0,14469 \text{ рад/с}. \quad (4.44)$$

Согласно (3.25) СКО системы с астатизмом первого порядка с принципом управления по отклонению  $\varepsilon = 0,2899$  рад/с, т.е. благодаря введению разомкнутой связи, синтезированной в соответствии

с условием повышения порядка астатизма с первого до второго и компенсации слабозатухающей компоненты переходной составляющей ошибки, соответствующей паре комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения, удалось уменьшить СКО в

$$\varepsilon / \varepsilon_K = 0,2899 / 0,14469 = 2,0036 \approx 2,004 \text{ раза}. \quad (4.45)$$

Таким образом, с помощью разомкнутой связи по задающему воздействию комбинированной системы, синтезированной в соответствии с условиями повышения порядка астатизма, удастся повысить динамическую точность системы не только при изменениях возмущающего воздействия по детерминированным законам, но и при случайном возмущающем воздействии  $\Delta \omega_C(t)$ .

### 4.3.3. Показатели качества переходных процессов комбинированной системы ЧАП с астатизмом второго порядка

В результате компенсации пары комплексно-сопряженных корней  $p_1$  и  $p_2$  характеристического уравнения замкнутой части системы с целью устранения соответствующей этим корням медленно затухающей компоненты переходного процесса системы характеристическое уравнение комбинированной согласно (4.30) определяется выражением

$$F_{\Delta \omega_{\text{ПР}}}(p) = b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p + b_4 = 0, \quad (4.46)$$

где

$$\begin{aligned} b_0 &= 5,277094831 \cdot 10^{-9}; & b_1 &= 1,8187595; \\ b_3 &= 0,007440062; & b_4 &= 0,1005207349, \end{aligned}$$

и имеет вещественные корни (4.29 а):

$$\begin{aligned} p_3 &= -201,040297; & p_{1C} &= -31,35629374; \\ p_{2C} &= -44,788768; & p_{3C} &= -67,193951. \end{aligned}$$

Изображение ошибки комбинированной системы ЧАП при возмущающем воздействии  $\Delta\omega_C(p) = \frac{D_C(p)}{F_C(p)}$  согласно (4.30) равно

$$\Delta\omega_{ПП}(p) = K_{\Delta\omega_{ПП}}(p) \Delta\omega_C(p) = \frac{D_{\Delta\omega_{ПП}}(p)}{F_{\Delta\omega_{ПП}}(p)} \frac{D_C(p)}{F_C(p)}, \quad (4.47)$$

где  $D_{\Delta\omega_{ПП}}(p) = a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2$ ;  
 $F_{\Delta\omega_{ПП}}(p) = b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p + b_4$ .

Переходная составляющая ошибки

$$\Delta\omega_{ПП}(t) = A_3 e^{p_3 t} + A_{1C} e^{p_{1C} t} + A_{2C} e^{p_{2C} t} + A_{3C} e^{p_{3C} t}, \quad (4.48)$$

где

$$A_i = \frac{D_{\Delta\omega_{ПП}}(p_i)}{F'_{\Delta\omega_{ПП}}(p_i)} \frac{D_C(p_i)}{F_C(p_i)}, \quad i=3, 1C, 2C, 3C.$$

При изменении возмущающего воздействия по закону единичной ступенчатой функции

$$\Delta\omega_C(t) = 1(t) \quad [\Delta\omega_C(p) = \frac{D_C(p)}{F_C(p)} = \frac{1}{p}; \quad D_C(p) = 1; \quad F_C(p) = p]$$

начальное значение  $i$ -й переходной составляющей ошибки имеет вид

$$A_i = \frac{D_{\Delta\omega_{ПП}}(p_i)}{F'_{\Delta\omega_{ПП}}(p_i)} \frac{1}{p_i} = \frac{a_0 p_i^4 + a_1 p_i^3 + a_2 p_i^2}{(4b_0 p_i^3 + 3b_1 p_i^2 + 2b_2 p_i + b_3) p_i} \frac{1}{p_i} = \frac{a_0 p_i^3 + a_1 p_i^2 + a_2 p_i}{4b_0 p_i^3 + 3b_1 p_i^2 + 2b_2 p_i + b_3}. \quad (4.49)$$

Подставив в (4.49) значения параметров из (4.30) и значения корней

$$\begin{aligned} p_3 &= -201,040297; & p_{1C} &= -31,35629374; \\ p_{2C} &= -44,788768; & p_{3C} &= -67,193951, \end{aligned} \quad (4.50)$$

получим соответственно

$$\begin{aligned} A_3 &= 0,371336; & A_{1C} &= -9,74528; \\ A_{2C} &= 20,6857; & A_{3C} &= -10,3118. \end{aligned} \quad (4.51)$$

Сумма начальных значений компонент равна единице:

$$A_3 + A_{1C} + A_{2C} + A_{3C} = 0,371336 - 9,74528 + 20,6857 - 10,31189 = 1,$$

что подтверждает правильность выполненных расчетов.

Подставив в (4.48) значения  $A_i$  из (4.51) и корней  $p_i$  из (4.50) характеристического уравнения, получим выражение для переходной составляющей ошибки комбинированной системы ЧАП:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{ПП}(t) &= A_3 e^{p_3 t} + A_{1C} e^{p_{1C} t} + A_{2C} e^{p_{2C} t} + A_{3C} e^{p_{3C} t} = \\ &= 0,37133 e^{-201,04 t} - 9,74528 e^{-31,3563 t} + \\ &+ 20,6857 e^{-44,7888 t} - 10,3118 e^{-67,194 t}. \end{aligned} \quad (4.52)$$

Компоненты переходной составляющей ошибки изображены на рис. 4.4 кривыми 1, 2, 3 и 4 соответственно, переходная составляющая ошибки – кривой 5 (масштаб кривой 5 увеличен в 10 раз).

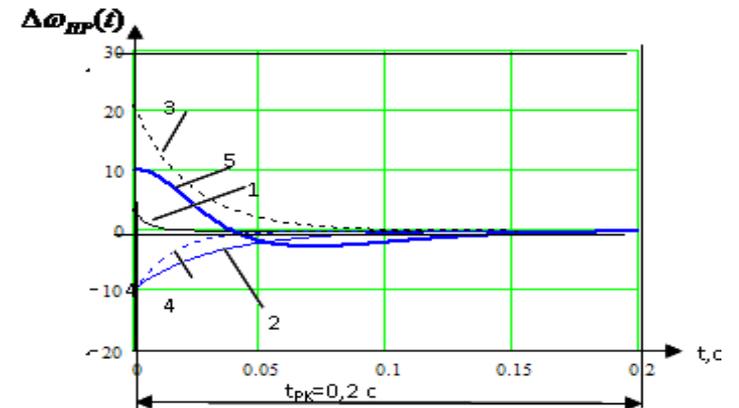


Рис. 4.4. Переходная составляющая ошибки комбинированной системы ЧАП с астатизмом второго порядка (кривая 5) и ее компоненты (кривые 1–4)

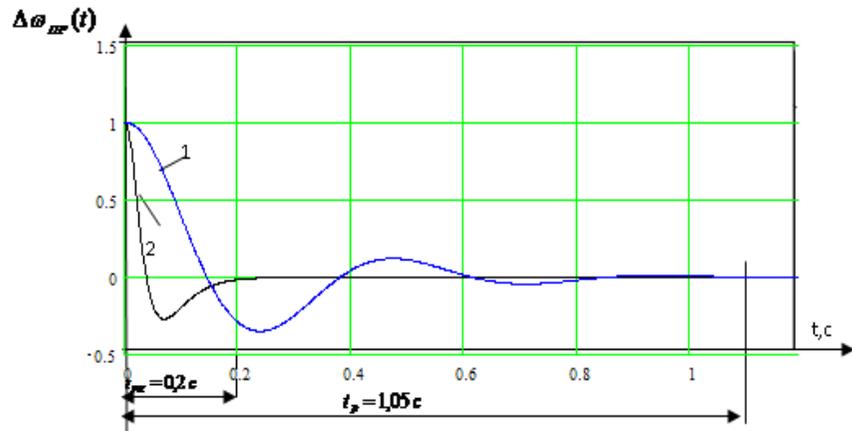


Рис. 4.5. Переходные составляющие традиционной системы ЧАП с принципом управления по отклонению (кривая 1) и комбинированной системы (кривая 2)

Согласно кривой 5 время переходного процесса  $t_p = 0,2$  с.

Для наглядности оценки влияния синтезированной связи по возмущающему воздействию на переходный процесс системы ЧАП на рис. 4.5 изображены переходные составляющие ошибки традиционной системы с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка (кривая 1) (рис. 3.4) и комбинированной системы (кривая 2).

Из рис. 4.5 видно, что время переходного процесса системы благодаря введению разомкнутой связи по возмущающему воздействию, синтезированной в соответствии с условием повышения порядка астатизма с первого до второго и условием компенсации медленно затухающей компоненты переходной составляющей ошибки, соответствующей паре комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения, уменьшилось (быстродействие системы повысилось) в

$$t_p/t_{PK} = 1,05/0,2 = 5,025 \text{ раза.} \quad (4.53)$$

**Выводы.** Введение в систему ЧАП с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка разомкнутой компенсационной связи по возмущающему воздействию  $\Delta\omega_C(t)$ , синтезированной

ной в соответствии с условием повышения динамической точности (увеличения порядка астатизма системы относительно возмущающего воздействия с первого до второго) и условием компенсации медленно затухающей компоненты (соответствующей комплексно-сопряженным корням характеристического уравнения) переходного процесса, вызываемого изменением возмущающего воздействия (условием повышения быстродействия системы), позволило:

- устранить скоростную ошибку  $\Delta\omega_{PP}(t)$ , вызываемую изменением возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(t)$  по линейному закону;
- возрастающую динамическую ошибку, вызываемую изменением возмущающего воздействия по квадратичному закону, ограничить конечным значением;
- среднеквадратическую ошибку, вызываемую случайным изменением возмущающего воздействия, уменьшить в 2,004 раза;
- время переходного процесса, вызываемого ступенчатым изменением возмущающего воздействия, уменьшить (быстродействие системы увеличить) в 5,025 раза.

#### 4.4. Моделирование системы ЧАП с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка и комбинированной системы с астатизмом второго порядка и компенсацией комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения

Приведем схемы и рассмотрим методику моделирования на ПЭВМ системы частотной автоподстройки с принципом управления по отклонению, имеющей астатизм первого порядка, и комбинированной системы, разомкнутая связь которой синтезирована в соответствии с условиями преобразования системы с астатизмом первого порядка в систему с астатизмом второго порядка с целью повышения динамической точности и компенсации пары комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения для повышения быстродействия системы.

Схемы и методика моделирования ЧАП с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка и комбинированной системы с астатизмом второго порядка. На рис. 4.6 изображены схемы моделирования ЧАП с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка (рис. 3.1 б) и комбинированной системы с астатизмом второго порядка (рис. 4.3) без раскрытия параметров передаточных функций элементов систем, а на рис. 4.7 – схемы моделирования этих систем на ПЭВМ.

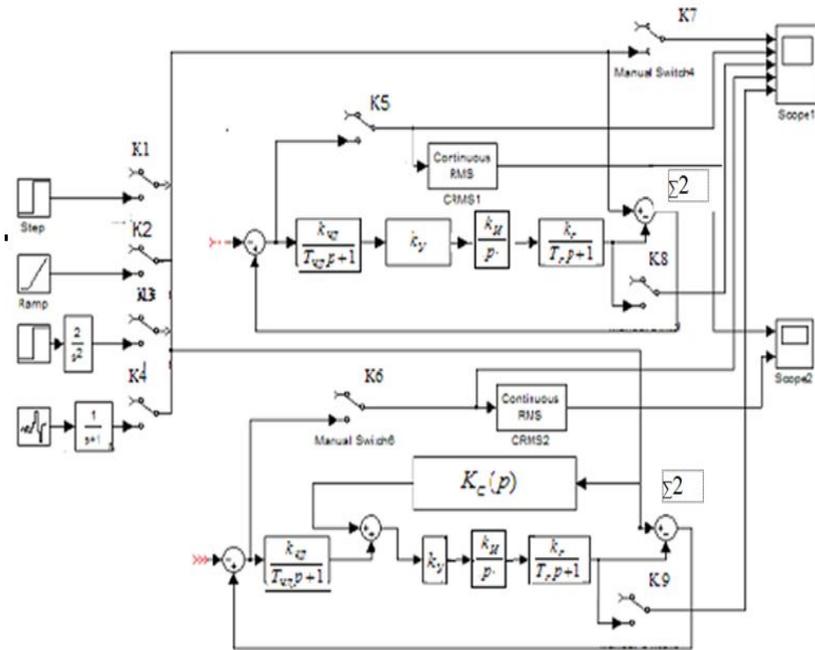


Рис. 4.6. Упрощенная схема моделирования системы ЧАП с астатизмом первого порядка с принципом управления по отклонению и комбинированной системы ЧАП с астатизмом второго порядка

Передаточная функция  $K_C(p)$  связи по возмущающему воздействию согласно (4.14) определяется выражением

$$K_C(p) = \frac{u_{yc}(p)}{\Delta\omega_C(p)} = \frac{k_{y2}(\tau_0 p^3 + \tau_1 p^2 + \tau_2 p)}{(T_{1C} p + 1)(T_{2C} p + 1)(T_{3C} p + 1)(T_{цдс} p + 1)}$$

но коэффициент  $\tau_2$  при первой производной возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C$  определен в соответствии с условием повышения порядка астатизма системы с первого до второго с целью уменьшения динамических и среднеквадратических ошибок, а коэффициенты  $\tau_1$  и  $\tau_0$  при второй и третьей производных синтезированы в соответствии с условием компенсации комплексных корней характеристического уравнения замкнутого контура системы, соответствующих медленно затухающей компоненте переходного процесса с целью повышения быстродействия системы (4.28).

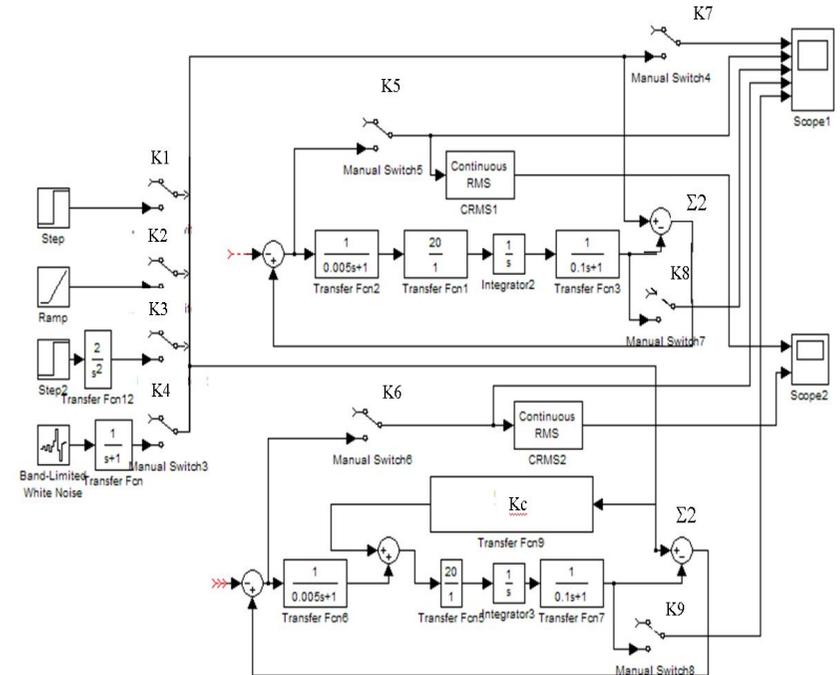


Рис. 4.7. Схемы моделирования системы ЧАП с астатизмом первого порядка с принципом управления по отклонению и комбинированной системы с астатизмом второго порядка

При замыкании ключа К1 на вычитающие устройства  $\Sigma 2$  обеих систем подается единичное ступенчатое возмущающее воздействие  $\Delta\omega_C(t)$ . Если при этом замкнуть ключи К7, К5 и К6, то на индикатор *Scope1* будут поданы возмущающее воздействие  $\Delta\omega_C(t)$ , ошибка  $\Delta\omega_{\text{ПР}}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и ошибка  $\Delta\omega_{\text{ПРК}}(t)$  комбинированной системы. Осциллограммы сигналов изображены на рис. 4.8 а.

При замыкании ключей К7...К9 на индикатор *Scope1* будут поданы возмущающее воздействие  $\Delta\omega_C(t)$  и управляемые величины  $\omega_{\Gamma}(t)$  и  $\omega_{\Gamma\text{К}}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и комбинированной системы. Осциллограммы сигналов изображены на рис. 4.8 б.

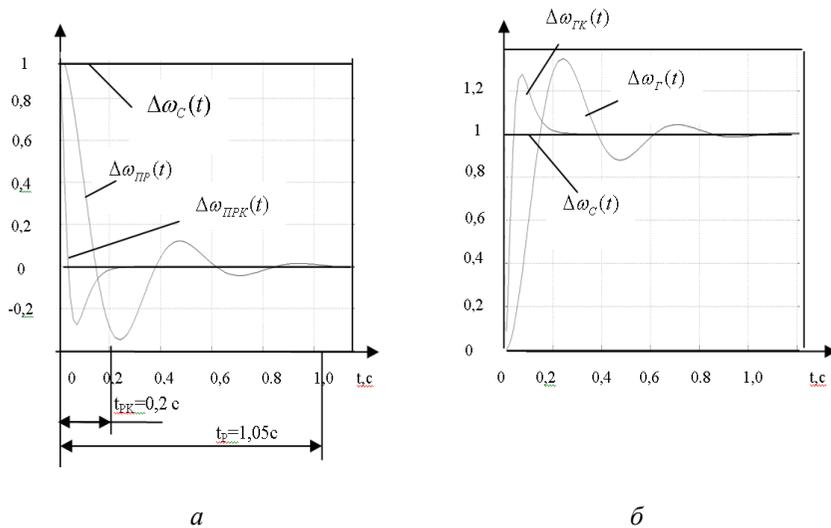


Рис. 4.8. Осциллограммы единичного ступенчатого возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(t)$ , ошибок  $\Delta\omega_{\text{ПР}}(t)$ ,  $\Delta\omega_{\text{ПРК}}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и комбинированной системы соответственно (а), единичного ступенчатого возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(t)$  и управляемых величин  $\omega_{\Gamma}(t)$ ,  $\omega_{\Gamma\text{К}}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и комбинированной системы (б)

Из рис. 4.8 следует, что установившаяся ошибка системы ЧАП с астатизмом первого порядка с принципом управления по отклонению и комбинированной системы с астатизмом второго порядка равны нулю.

Переходные функции, полученные в результате моделирования (рис. 4.8), с большой точностью совпадают с расчетными (рис. 3.4, 4.5): время переходного процесса системы благодаря введению связи по возмущающему воздействию, синтезированной в соответствии с условием подавления медленно затухающей компоненты переходного процесса, соответствующей паре комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения, уменьшилось (быстродействие увеличилось) в  $1,05 / 0,2 = 5,025$  раза.

При замыкании ключа К2 на вычитающие устройства  $\Sigma 2$  обеих систем поступает возмущающее воздействие, изменяющееся по линейному закону

$$\Delta\omega_C(t) = \alpha_1 t,$$

где  $\alpha_1 = 1/c^2$ . Если при этом замкнуть ключи К7, К5 и К6, на индикатор *Scope1* будут поданы возмущающее воздействие  $\Delta\omega_C(t)$ , ошибка  $\Delta\omega_{\text{ПР}}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и ошибка  $\Delta\omega_{\text{ПРК}}(t)$  комбинированной системы. Осциллограммы сигналов изображены на рис. 4.9 а.

При замыкании ключей К7...К9 на индикатор *Scope1* будут поданы возмущающее воздействие  $\Delta\omega_C(t)$  и управляемые величины  $\omega_{\Gamma}(t)$  и  $\omega_{\Gamma\text{К}}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и комбинированной системы. Осциллограммы сигналов изображены на рис. 4.9 б.

Осциллограммы (рис. 4.9) подтверждают, что в системе с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка при линейном изменении возмущающего воздействия возникает ограниченная по величине динамическая ошибка  $\Delta\omega_{\text{ПР}}(t)$  (3.14), а в комбинированной системе ошибка  $\Delta\omega_{\text{ПРК}}$  равна нулю (4.35). Время переходного процесса при введении связи по возмущению уменьшилось в пять раз.

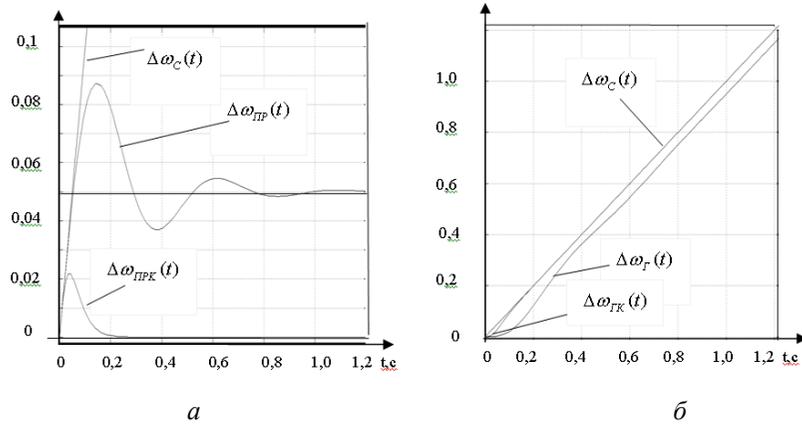


Рис. 4.9. Осциллограммы возмущающего воздействия  $\Delta\omega_c(t)$ , изменяющегося по линейному закону, ошибок  $\Delta\omega_{ПР}(t)$ ,  $\Delta\omega_{ПРК}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и комбинированной системы соответственно (а), возмущающего воздействия  $\Delta\omega_c(t)$  и управляемых величин  $\omega_\Gamma(t)$ ,  $\Delta\omega_{ГК}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и комбинированной системы (б)

При замыкании ключа К3 на вычитающие устройства  $\Sigma 2$  обеих систем поступает возмущающее воздействие, изменяющееся по квадратичному закону

$$\Delta\omega_c(t) = \alpha_2 t^2,$$

где  $\alpha_2 = 11/c^3$ . Если при этом замкнуть ключи К7, К5 и К6, на индикатор *Scope1* будут поданы возмущающее воздействие  $\Delta\omega_c(t)$ , ошибка  $\Delta\omega_{ПР}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и ошибка  $\Delta\omega_{ПРК}(t)$  комбинированной системы. Осциллограммы сигналов изображены на рис. 4.10 а.

При замыкании ключей К7...К9 на индикатор *Scope1* будут поданы возмущающее воздействие  $\Delta\omega_c(t)$  и управляемые величины  $\omega_\Gamma(t)$  и  $\omega_{ГК}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и комбинированной системы. Осциллограммы сигналов изображены на рис. 4.10 б.

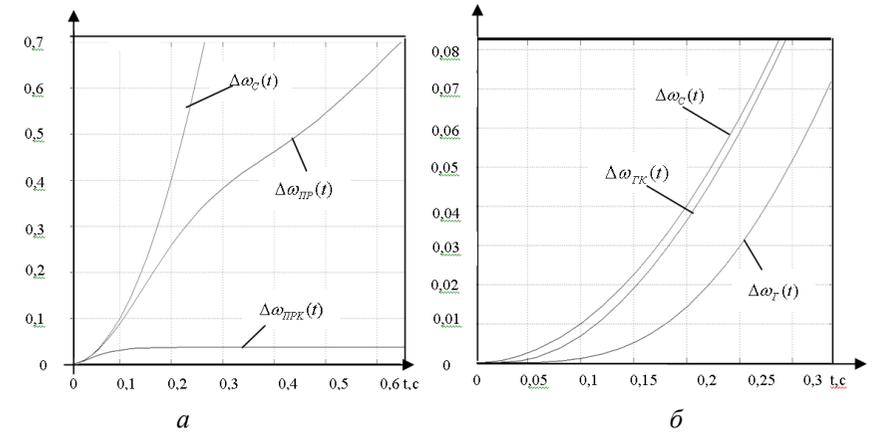


Рис. 4.10. Осциллограммы возмущающего воздействия  $\Delta\omega_c(t)$ , изменяющегося по квадратичному закону, ошибок  $\Delta\omega_{ПР}(t)$ ,  $\Delta\omega_{ПРК}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и комбинированной системы соответственно (а), возмущающего воздействия  $\Delta\omega_c(t)$  и управляемых величин  $\omega_\Gamma(t)$ ,  $\Delta\omega_{ГК}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и комбинированной системы (б)

Осциллограммы (рис. 4.10) подтверждают вывод о том, что в системе с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка при изменении возмущающего воздействия по квадратичному закону возникает возрастающая динамическая ошибка  $\Delta\omega_{ПР}(t)$  (3.15), а в комбинированной системе ошибка ограничена по величине  $\Delta\omega_{ПРК} = 0,037$ , что согласуется с расчетами (4.36), (4.37).

При замкнутом ключе К4 на обе системы параллельно поступает случайное возмущающее воздействие  $\Delta\omega_c$  со спектральной плотностью  $S_{BX} = \frac{1}{\omega^2 + \beta^2}$ ,  $\beta = 1$ , которое сформировано из белого шума с помощью аperiodического звена с передаточной

функцией  $\frac{1}{s+1}$ . В этом случае при замыкании ключей К7, К5 и К6 на индикатор *Scope1* будет подано возмущающее воздействие  $\Delta\omega_C(t)$  и ошибки  $\Delta\omega_{\text{ПР}}(t)$  и  $\Delta\omega_{\text{ПРК}}(t)$  обеих систем, осциллограммы которых изображены на рис. 4.11.

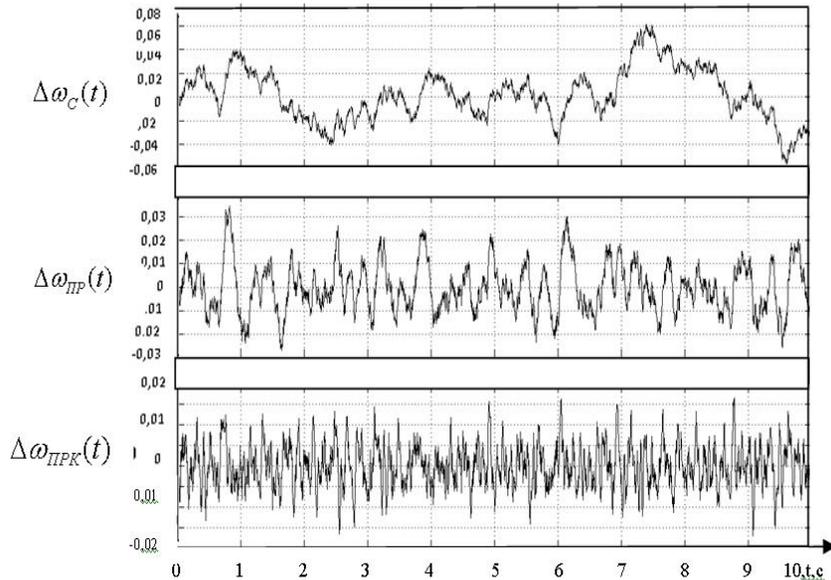


Рис. 4.11. Осциллограммы случайного возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(t)$ , ошибки системы с принципом управления по отклонению  $\Delta\omega_{\text{ПР}}(t)$  и ошибки  $\Delta\omega_{\text{ПРК}}(t)$  комбинированной системы ЧАП

Из сравнения осциллограмм ошибок  $\Delta\omega_{\text{ПР}}(t)$  и  $\Delta\omega_{\text{ПРК}}(t)$  следует, что с помощью введения разомкнутой связи по возмущающему воздействию удастся существенно уменьшить случайную ошибку системы.

Для количественной оценки влияния разомкнутой связи на точность случайные ошибки  $\Delta\omega_{\text{ПР}}(t)$  и  $\Delta\omega_{\text{ПРК}}(t)$  обеих систем последние через вычислительные устройства CRMS1 и CRMS2,

определяющие СКО в соответствии с формулой  $\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta\omega_{\text{ПР}}^2(t) dt}$ ,

подаются на индикатор *Scope2*. Кривая  $\varepsilon$  (рис. 4.12) соответствует среднеквадратическому значению ошибки системы с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка, а кривая  $\varepsilon_K$  – СКО комбинированной системы с астатизмом второго порядка.

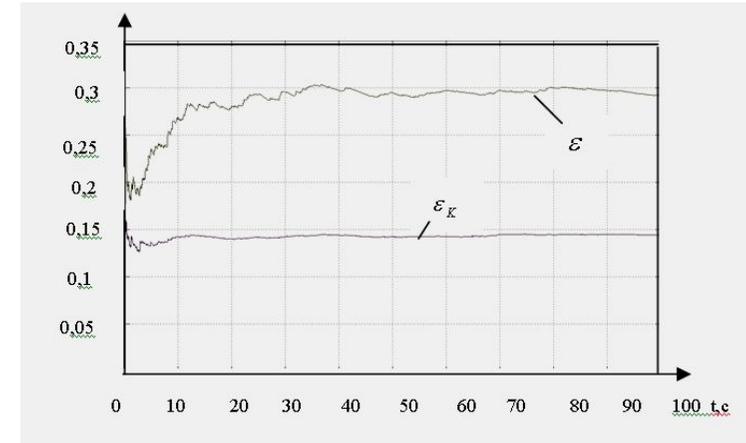


Рис. 4.12. Осциллограммы среднеквадратических ошибок системы ЧАП с астатизмом первого порядка с принципом управления по отклонению  $\varepsilon$  и ошибки  $\varepsilon_K$  комбинированной системы с астатизмом второго порядка

В табл. 4.1 приведены расчетные значения СКО  $\varepsilon$  системы управления по отклонению (3.25), значение СКО комбинированной системы  $\varepsilon_K$  (4.44) и их значения, полученные в результате моделирования (рис. 4.12).

Согласно табл. 4.1 расчетные значения среднеквадратических ошибок при случайном возмущающем воздействии с большой точностью совпадают с их значениями, полученными в результате моделирования, что свидетельствует о справедливости выполненных теоретических расчетов и об эффективности метода повышения точности системы (в 2,0422 раза) при случайном возмущающем

воздействии с помощью разомкнутой связи по возмущающему воздействию.

Таблица 4.1

СКО систем и их отношение	Расчетные значения	Результаты моделирования
$\varepsilon$	0,2899	0,29
$\varepsilon_K$	0,14469	0,142
$\varepsilon / \varepsilon_K$	2,0036	2,0422

При замыкании ключей К4, К7 и К8 на индикатор *Scope1* подаются случайное возмущающее воздействие  $\Delta\omega_C(t)$  и управляемая величина  $\Delta\omega_G(t)$  на выходе генератора системы с принципом управления по отклонению, осциллограммы которых изображены на рис. 4.13 а, при замыкании ключей К4, К7 и К9 на индикатор *Scope1* подаются возмущающее воздействие  $\Delta\omega_C(t)$  и управляемая величина  $\Delta\omega_{ГК}(t)$  на выходе генератора комбинированной системы, осциллограммы которых изображены на рис. 4.13 б.

Согласно рис. 4.13 между случайным возмущающим воздействием  $\Delta\omega_C(t)$  и управляемой величиной  $\Delta\omega_G(t)$  на выходе генератора системы с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка имеется большее расхождение (а), чем между возмущающим воздействием  $\Delta\omega_C(t)$  и управляемой величиной  $\Delta\omega_{ГК}(t)$  комбинированной системы с астатизмом второго порядка.

В сводной табл. 4.2 изображены осциллограммы возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(t)$ , изменяющегося по различным законам, в том числе и в виде случайной функции, осциллограммы ошибок  $\Delta\omega_{ПР}(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению и комбинированной системы  $\Delta\omega_{ПРК}(t)$ , среднеквадратических ошибок  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_K$ , осциллограммы возмущающего воздействия  $\Delta\omega_C(t)$  и управляемой величины на входе смесителей  $\Delta\omega_G(t)$  и  $\Delta\omega_{ГК}(t)$  обеих систем.

Таблица 4.2

Закон изменения $\Delta\omega_c(t)$	Ошибки		Выходные сигналы	
	исходной системы $\Delta\omega_{ПР}(t)$	комбинированной системы $\Delta\omega_{ПРК}(t)$	исходной системы $\Delta\omega_r(t)$	комбинированной системы $\Delta\omega_{ГК}(t)$

В заключение следует отметить, что результаты моделирования на ПЭВМ системы ЧАП, построенной на основании принципа управления по отклонению с астатизмом первого порядка и предложенной комбинированной системы с астатизмом второго порядка, подтвердили возможность существенного уменьшения динамических, среднеквадратических ошибок и повышения быстродействия системы с помощью разомкнутой компенсационной связи по возмущающему воздействию  $\Delta\omega_c(t)$  (отклонению частоты поступающего сигнала относительно номинального значения), синтези-

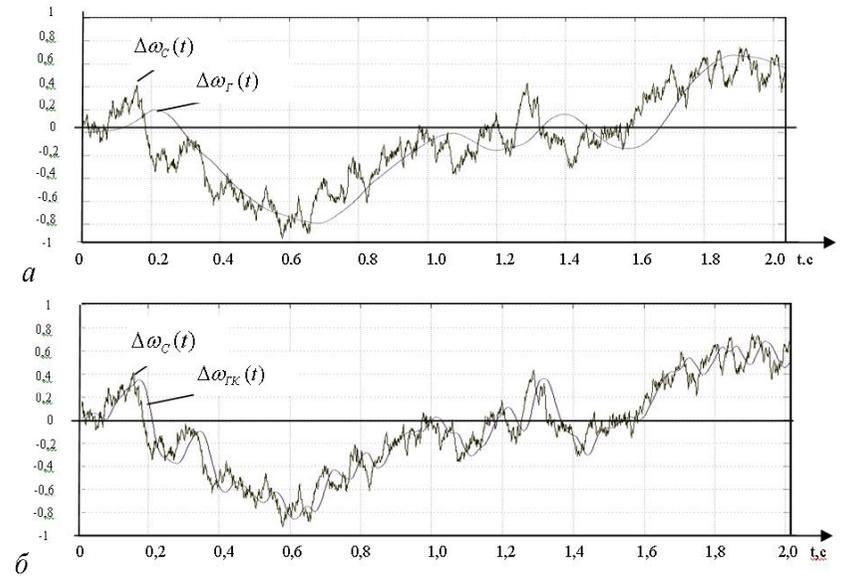


Рис. 4.13. Осциллограммы случайного возмущающего воздействия  $\Delta\omega_c(t)$  и управляемой величины на выходе генератора  $\Delta\omega_r(t)$  системы ЧАП с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка (а), возмущающего воздействия  $\Delta\omega_c(t)$  и управляемой величины  $\Delta\omega_{ГК}(t)$  комбинированной системы с астатизмом второго порядка (б)

рованной в соответствии с условиями повышения порядка астатизма системы ЧАП – с первого до второго и компенсацией медленно затухающей компоненты переходного процесса, соответствующей паре комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения.