

Гниденко О. Н. Украинский Государственный центр радиочастот, Киев

Гниденко Н. П., Ильин О. А. Государственный университет телекоммуникаций, Киев

ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ ЧАСТОТНОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ В РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Дана сравнительная оценка динамических характеристик различных статических систем частотной автоподстройки. Повышение динамической точности достигнуто путем введения в систему ЧАП с астатизмом первого порядка с принципом управления по отклонению разомкнутой связи по возмущающему воздействию, синтезированную в соответствии с условиями повышения порядка астатизма с первого до второго.

Ключевые слова: динамическая точность, астатическая система, система частотной автоподстройки (ЧАП), интегрирующий элемент, сравнительная оценка.

Гніденко О. М. Український Державний центр радіочастот, Київ

Гніденко М. П., Ільїн О. О. Державний університет телекомунікацій, Київ

ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ У РАДІОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИБОРАХ

Дана порівняльна оцінка динамічних характеристик статичної системи ЧАП з принципом управління за відхиленням, комбінованої системи ЧАП з астатизмом першого порядку і системи ЧАП з астатизмом першого порядку з принципом управління за відхиленням. Показано, що в статичній системі ЧАП з принципом управління за відхиленням має місце протиріччя між умовами підвищення динамічної точності та стійкості, що є перешкодою на шляху підвищення показників якості системи. Підвищення динамічної точності може бути досягнуто шляхом перетворення статичної системи в астатичну з астатизмом першого порядку (залишаючись системою з принципом управління за відхиленням) в результаті включення в замкнений контур системи інтегруючого елемента. Розроблено математичні моделі комбінованої системи частотного автопідстроювання з астатизмом першого і другого порядку, розглянуті їх переваги і недоліки.

З порівняння динамічних характеристик систем випливає, що система ЧАП з принципом управління за відхиленням з астатизмом першого порядку (з інтегруючим елементом) має перевагу і її доцільно застосовувати у випадках, коли необхідна висока точність в стаціонарних умовах, коли збурюючий вплив змінюється відповідно до детермінованих законів і немає жорстких вимог до швидкості і стандартних помилок для випадкових збурюючих впливів. Подальше підвищення динамічної точності досягається шляхом введення в систему ЧАП з астатизмом першого порядку з принципом управління за відхиленням розімкнутого зв'язку по збурюючій дії, синтезовану відповідно до умов підвищення порядку астатизму з першого до другого, тобто побудовою системи частотного автопідстроювання з принципом комбінованого управління.

Ключові слова: динамічна точність, астатична система, система частотного автопідстроювання (ЧАП), інтегруючий елемент, порівняльна оцінка.

Гниденко О. М. Ukrainian State Centre of Radio Frequencies, Kyiv

Гниденко М. П., Ільїн О. О. State University of Telecommunications, Kyiv

THE INCREASING OF DYNAMIC ACCURACY OF THE AUTO ADJUSTMENTS OF FREQUENCY SYSTEM IN RADIO-RECEIVERS

A comparative assessment of the dynamic characteristics of the static auto adjustments of frequency (AAF) system with the principle of deviation control, the combined auto adjustments of frequency (AAF) system with first order astatism, and the auto adjustments of frequency (AAF) system with first order astatism with the principle of deviation control is given.

It is shown that in the static AAF system with the principle of control by deviation there is a contradiction between the conditions for increasing the dynamic accuracy and stability, which is an obstacle to improving the quality indicators of the system. An increase in dynamic accuracy can be achieved by converting a static system into an astatic with an first-order astaticism as a result of the inclusion of an integrating element in a closed loop. A mathematical model is developed for a combined system of PRTs with first-order astaticism. In order to reduce dynamic errors and increase performance, a combined AAF system with second-order astaticism is proposed.

From the comparison of the dynamic characteristics of the AAF systems, it follows that the AAF system with the principle of deviation control with first order astaticism (with an integrating element) has the advantage and it is expedient to apply it in cases when high accuracy is required in steady-state conditions when the disturbing influence changes according to deterministic laws and there are no strict requirements for speed and standard errors for random disturbing influences. A further increase in dynamic accuracy is achieved by introducing to a first order astaticism AAF system with the principle of deviation control the open connection by a disturbing influence, synthesized in accordance with the conditions for increasing astaticism from first to second, that is the construction of the AAF system with the principle of combined control.

Keywords: dynamic accuracy. astatic system, system auto adjustments of frequency (AAF), integrating element, comparing estimate.

1. Постановка задачи. Системы частотной автоподстройки (ЧАП) широко используются в аппаратуре радиосетей для стабилизации частоты напряжения управляемого генератора, слежения за частотой напряжения сигнала, стабилизации промежуточной частоты в радиоприемных устройствах самого различного назначения, в демодуляторах частотно-модулированных сигналов с обратной связью по частоте и др. Особенно это актуально для радиоприемных устройств системы радиочастотного мониторингу.

В отличие от систем фазовой автоподстройки частоты, в которых стабилизация частоты и слежение по частоте достигается благодаря синфазированию опорного (задающего) и управляемого напряжений, в системах ЧАП указанные задачи решаются в результате непосредственного измерения разности частот задающего и управляемого напряжений и уменьшения этой разности. Фазовые соотношения между задающим и управляемым напряжениями не принимаются во внимание и могут произвольно изменяться.

Требования к показателям качества аппаратуры радиосетей, где широко применяются систем частотной автоподстройки, непрерывно повышаются. Поэтому необходимо улучшать динамические характеристики систем частотной автоподстройки. Необходимо повышать их динамическую точность и быстродействие. Для определения основных направлений улучшения этих показателей, проведем сравнительный анализ статической системы ЧАП с принципом управления по отклонению [1], комбинированной системы ЧАП с астатизмом первого порядка [2, 3] и системы ЧАП с астатизмом первого порядка с принципом управления по отклонению [4].

2. Статическая система ЧАП с принципом управления по отклонению.

Функциональная схема статической системы частотной автоподстройки (ЧАП) с принципом управления по отклонению, используемой в настоящее время в радиоприемных устройствах, изображена на рис.1,а [1]. Данную систему ЧАП можно рассматривать как следящую систему, обеспечивающую изменение частоты $\omega_r(t)$ управляемого генератора УГ в соответствии с изменением частоты сигнала $\omega_c(t)$, а также как систему стабилизации промежуточной частоты на уровне $\omega_{\text{ПР0}}$. В последнем случае задающим воздействием является частота $\omega_{\text{ПР0}}$ настройки ЧД, управляемой величиной – промежуточная частота $\omega_{\text{ПР}}(t)$, а возмущающим воздействием, вызывающим отклонение $\Delta\omega_{\text{ПР}}(t)$ промежуточной частоты $\omega_{\text{ПР}}(t)$ от $\omega_{\text{ПР0}}$, - изменение частоты $\omega_c(t)$ поступающего сигнала $u_c(t)$.

В этом случае функциональную схему системы ЧАП можно изобразить, как на рис. 1,б. На схеме частотный дискриминатор ЧД представлен в виде соединения элемента сравнения ЭС, выполняющего функцию вычитания $\Delta\omega_{np}(t) = \omega_{np0} - \omega_{np}(t)$, и преобразователя ЧДп отклонения $\Delta\omega_{np}(t)$ промежуточной частоты в напряжение $u_{чд}(t)$.

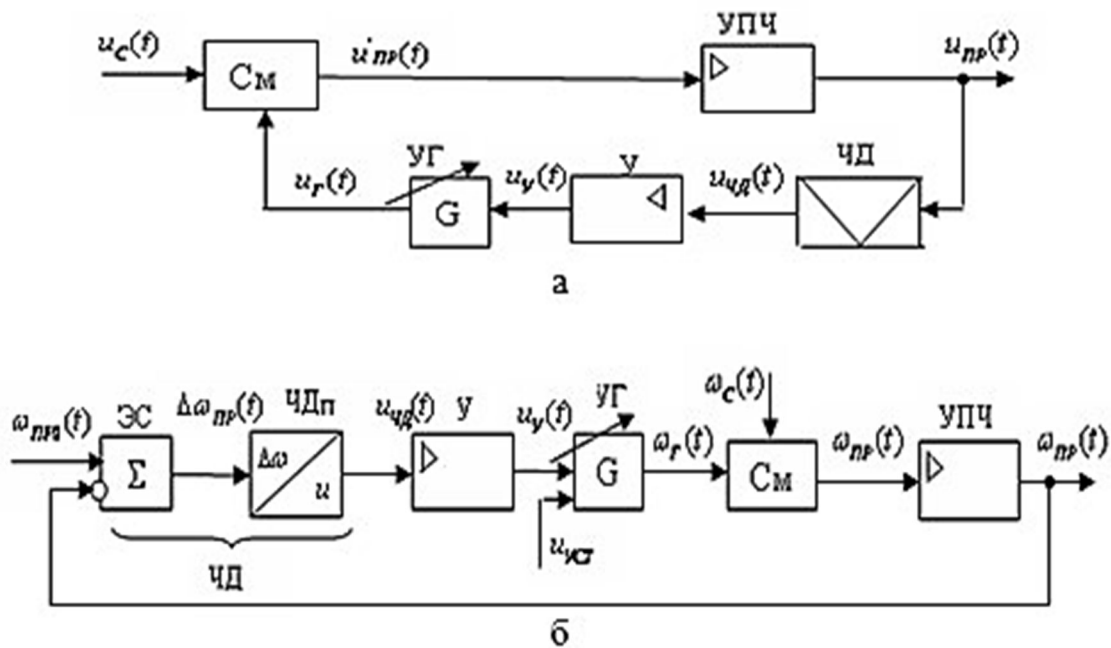


Рис.1. Функциональная схема статической системы ЧАП

В статической ЧАП с принципом управления по отклонению при ступенчатом изменении возмущающего воздействия (частоты сигнала) $\Delta\omega_c(t)$ в установившемся режиме возникает постоянная ошибка (отклонение промежуточной частоты от номинального значения) $\Delta\omega_{np}(t)$, пропорциональная $\Delta\omega_c(t) = \omega_0$ и обратно пропорциональное $(1 + k_p)$. Для уменьшения ошибки $\Delta\omega_{np}(t)$ следует увеличивать коэффициент усиления системы k_p в разомкнутом состоянии.

Однако при увеличении k_p , уменьшается запас устойчивости по фазе, система приближается к границе устойчивости, ухудшается переходный процесс. Отсюда следует, что в статической ЧАП с принципом управления по отклонению имеет место противоречие между условиями повышения динамической точности и устойчивости, являющееся препятствием на пути повышения показателей качества системы.

3. Комбинированная система ЧАП с астатизмом первого порядка

Возможность повышения динамической точности и быстродействия статической системы ЧАП возможно с помощью введения в систему компенсационной связи по возмущающему воздействию $\Delta\omega_c(t)$, т.е. путем построения комбинированной системы ЧАП, синтезированной в соответствии с условием преобразования статической системы в систему с астатизмом первого порядка и условием компенсации слабо затухающей компоненты переходного процесса [2].

Для преобразования статической системы в астатическую первого порядка астатизма достаточно с помощью связи по возмущению подать в систему сигнал, пропорциональный этому возмущению. Функциональная схема приведена на рис. 2.

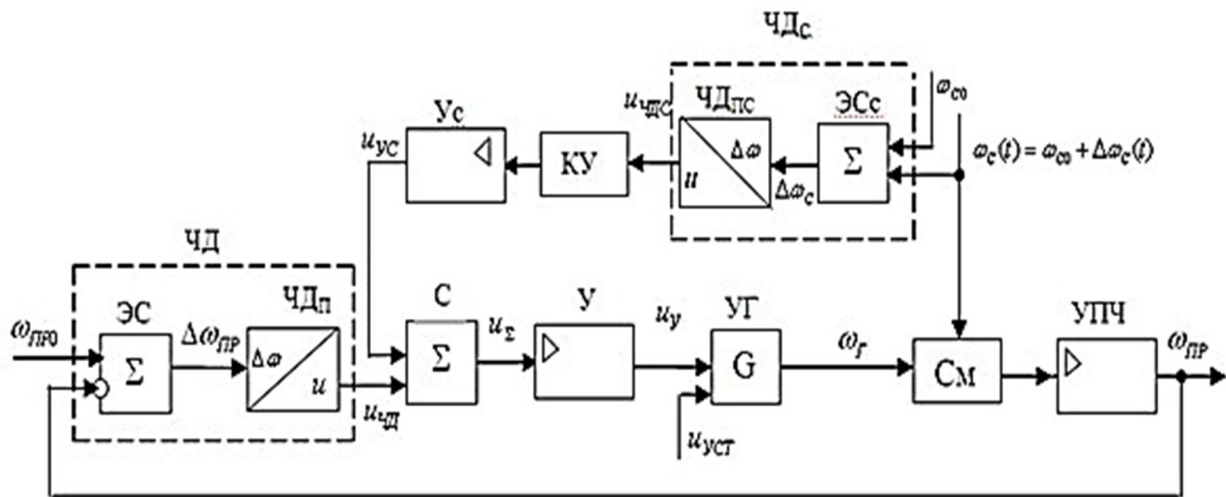


Рис. 2. Функциональная схема комбинированной системы ЧАП с астатизмом первого порядка и повышенным быстродействием

Математическая модель (структурная схема) комбинированной системы ЧАП с астатизмом первого порядка в соответствии с функциональной схемой (рис. 2) при использовании уравнений в отклонениях приведена на рис. 3.

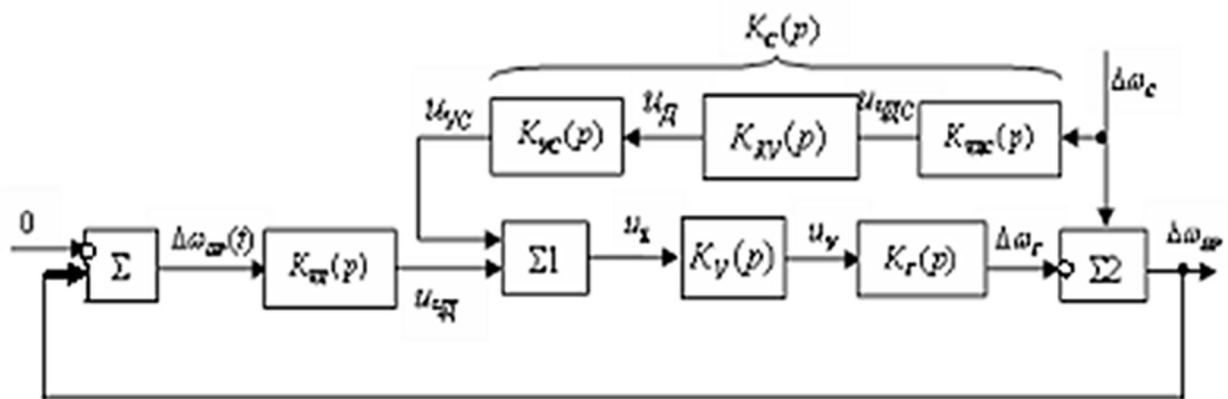


Рис. 3. Математическая модель комбинированной системы ЧАП с астатизмом первого порядка

Как и для системы с принципом управления по отклонению [1] были определены установившиеся динамические ошибки комбинированной системы частотной автоподстройки (ЧАП), математическая модель которой изображена на рис. 3 [2] при ступенчатом, линейном и квадратичном законах изменения возмущающего воздействия.

Переходная составляющая ошибки комбинированной системы ЧАП с астатизмом первого порядка при единичном ступенчатом изменении возмущающего воздействия $\Delta\omega_c(t)$ и параметрах связи по возмущающему воздействию, синтезированных из условия повышения порядка астатизма и условия подавления медленно затухающей компоненты, определяется выражением [3]:

$$\Delta\omega_{ПРК}(t) = 0,26139e^{-137,01562t} + 1,54885e^{-500t} - 0,81024e^{-1000t}.$$

Графики изменения во времени компонент переходной составляющей ошибки на рис. 4, изображены кривыми 1, 2, 3, соответственно, а переходная составляющая ошибки – кривой 4. Из рис. 4 следует, что время переходного процесса $t_{ПК} = 0,02 \text{ с}$.

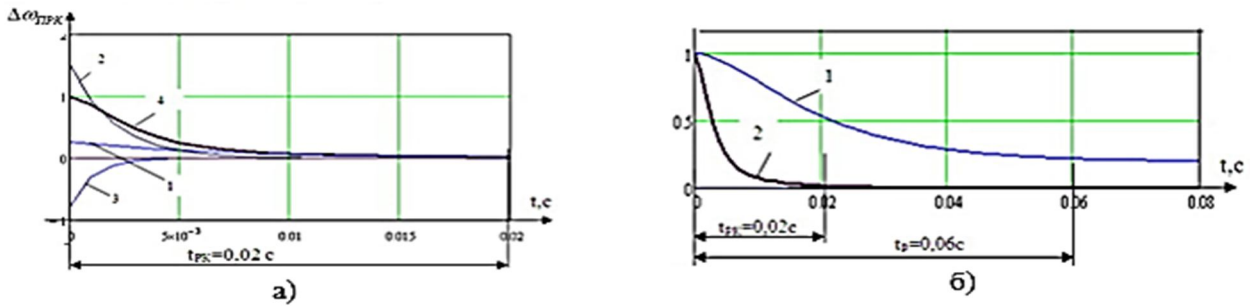


Рис. 4. Переходные составляющие ошибки комбинированной системы ЧАП
 а) – статическая системы ЧАП (кривая 1); б) – комбинированной системы ЧАП (кривая 2)

Для наглядности оценки влияния связи по возмущающему воздействию на переходный процесс на рис.4.б изображены переходные составляющие ошибки системы с принципом управления по отклонению [2] (кривая 1) и комбинированной системы (кривая 2).

Из рис.4.б видно, что время переходного процесса системы благодаря введению связи по возмущающему воздействию, синтезированной в соответствии с условием преобразования статической системы ЧАП в систему с астатизмом первого порядка и условием компенсации медленно затухающей компоненты переходной составляющей ошибки уменьшилось (быстродействие увеличилось) в $t_p / t_{PK} = 0,06 / 0,02 = 3$ раза.

4. Система ЧАП с астатизмом первого порядка с принципом управления по отклонению.

Повышение динамической точности по сравнению со статической системой ЧАП может быть достигнуто путем преобразования статической системы в астатическую систему с астатизмом первого порядка (оставаясь системой с принципом управления по отклонению) в результате включения в замкнутый контур системы интегрирующего элемента [4].

Функциональная схема системы ЧАП с принципом управления по отклонению с электронным интегратором И показана на рис. 5.а. Функциональной схеме системы ЧАП (рис.5.а) соответствует математическая модель, показанная на рис.5.б.

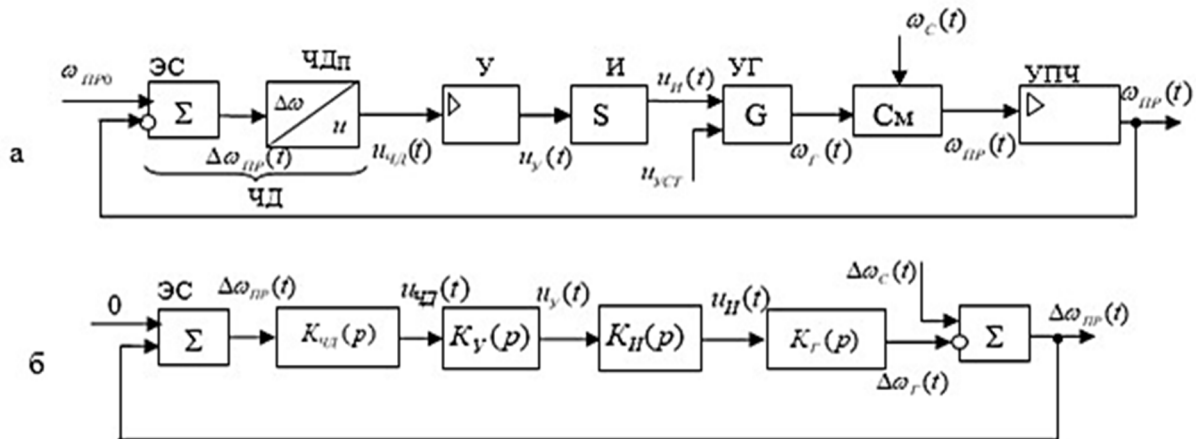


Рис.5. Схемы астатической системы ЧАП: с интегратором (а), математическая модель системы (б)

Для такой системы [4], благодаря включению интегратора, ошибка $\Delta\omega_{ПР}(t)$ системы ЧАП при ступенчатом изменении частоты сигнала $\omega_c(t)$ в установившемся режиме уменьшается до нуля. Система частотной автоподстройки устойчива и имеет запас устойчивости по фазе 33 0, а по амплитуде – 20 дБ. Установившаяся ошибка при ступенчатом изменении возмущающего воздействия равна нулю, при линейном изменении динамическая ошибка

ограничена конечным значением, а при квадратичном изменении ошибка стремится к бесконечности.

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 производительности передачи и преобразования дискретной информации показатели качества системы ЧАП с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка не полностью удовлетворяют этим требованиям. Поэтому стоит проблема повышения динамической точности и быстродействия систем ЧАП.

5. Сравнение динамических характеристик систем ЧАП

Из сравнения динамических характеристик статической системы ЧАП с принципом управления по отклонению [1], комбинированной системы с астатизмом первого порядка и повышенным быстродействием [2,3] и системы ЧАП с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка (с интегрирующим элементом) следует [3]:

в системе ЧАП с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка, как и в комбинированной системе с астатизмом первого порядка установившаяся ошибка при ступенчатом изменении возмущающего воздействия устранена по сравнению со статической системой, при линейном изменении динамическая ошибка ограничена конечным значением, при квадратичном законе изменения ошибка стремится к бесконечности;

время переходного процесса увеличилось (быстродействие уменьшилось) от 0,06 с в исходной системе и от 0,02 с в комбинированной до 1,05 с; среднеквадратическая ошибка увеличилась по сравнению с исходной системой от 0,177, комбинированной системой от 0,04683 до 0,2899.

Из приведенного сравнения динамических характеристик систем ЧАП следует, что систему ЧАП с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка (с интегрирующим элементом) целесообразно применять в тех случаях, когда требуется высокая точность в установившихся режимах при изменении возмущающего воздействия по детерминированным законам и не предъявляются жесткие требования к быстродействию и среднеквадратическим ошибкам при случайных возмущающих воздействиях.

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

Одним из способов уменьшения динамических ошибок систем автоматического управления, к которым относится и система ЧАП, является повышение коэффициента усиления системы в разомкнутом состоянии. Однако при увеличении коэффициента усиления уменьшается запас устойчивости системы, что приводит к ухудшению переходных процессов, уменьшению ее быстродействия, т.е. в системах ЧАП с принципом управления по отклонению имеется противоречие между условием повышения динамической точности и условием 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 и 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 [5].

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 (по сравнению со статической системой и комбинированной системой с астатизмом первого порядка) 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 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.

Замкнутая часть функциональной схемы комбинированной системы ЧАП (рис.6,а) изображена на рис.5,а. Ее особенностью является то, что преобразование статической системы ЧАП (рис.1а,б) в систему с астатизмом первого порядка достигнуто включением в замкнутый контур системы интегрирующего элемента И.

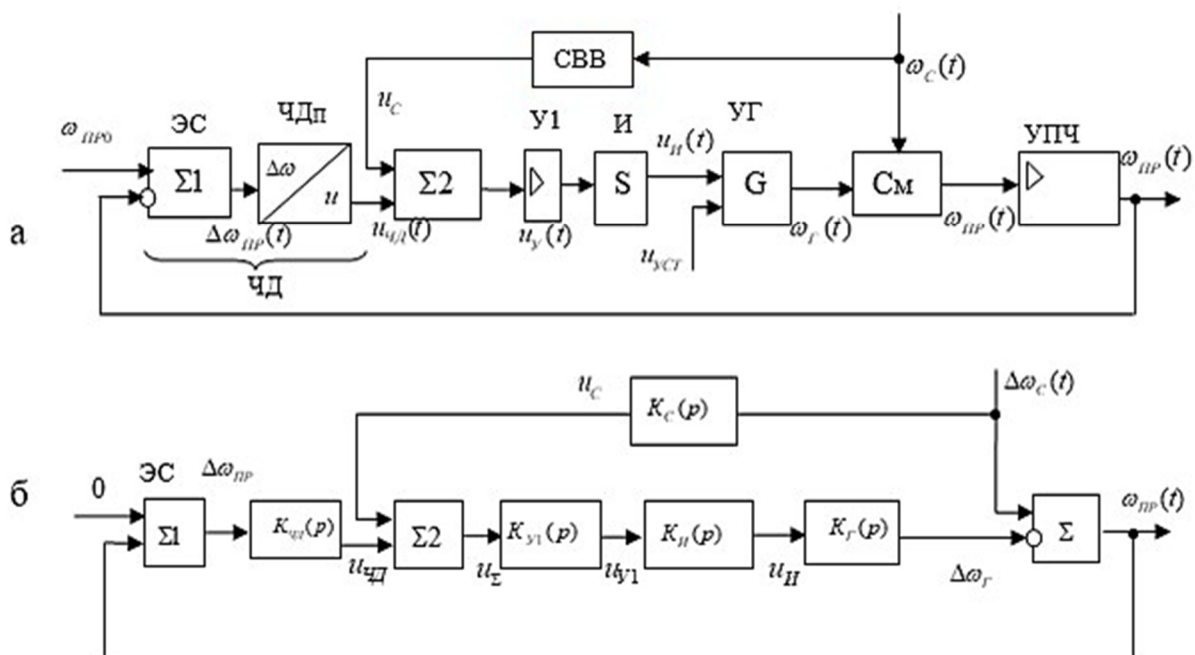


Рис. 6. Функциональная схема (а) и математическая модель (б) комбинированной системы ЧАП с астатизмом второго порядка и повышенным быстродействием

На математической модели (рис.6,б) передаточные функции элементов системы:

$$\left. \begin{aligned}
 K_{чд}(p) &= \frac{u_{чд}(p)}{\Delta\omega_{нр}(p)} = \frac{k_{чд}}{T_{чд}p+1} = \frac{D_{чд}(p)}{F_{чд}(p)}, \quad k_{чд} = 1, T_{чд} = 0,005 \text{ – дискриминатора ЧДП;} \\
 K_{у1}(p) &= k_{у1} = \frac{D_{у1}(p)}{F_{у1}(p)}, \text{ где } k_{у1} = 20, \text{ – усилителя У1;} \\
 K_{и}(p) &= \frac{u_{и}(p)}{u_{у1}(p)} = \frac{k_{и}}{p} = \frac{D_{и}(p)}{F_{и}(p)}, \text{ где } k_{и} = 1, \text{ – интегратора;} \\
 K_{г}(p) &= \frac{\Delta\omega_{г}(p)}{u_{и}(p)} = \frac{k_{г}}{T_{г}p+1} = \frac{D_{г}(p)}{F_{г}(p)}, \quad k_{г} = 1, \quad T_{г} = 0,1 \text{ – управляемого генератора УГ;} \\
 K_{с}(p) &= \frac{\Delta\omega_{с}(p)}{u_{с}(p)} = \frac{D_{с}(p)}{F_{с}(p)} \text{ – передаточная функция по возмущающему воздействию.}
 \end{aligned} \right\} (1)$$

Новым элементом комбинированной системы (рис.6.а) по сравнению с системой ЧАП с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка (рис.5,а) является введенная разомкнутая связь по возмущающему воздействию СВВ, с помощью которой на сумматор $\Sigma 2$ подается сигнал, являющийся функцией возмущающего воздействия $\omega_c(t)$.

7. Анализ математической модели комбинированной системы ЧАП (рис. 6,б)

В соответствии с математической моделью (рис. 6,б) комбинированная система ЧАП описывается следующей системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \Delta\omega_{\text{пр}}(p) &= \Delta\omega_c(p) - \Delta\omega_r(p), \\ \Delta\omega_r(p) &= K_{\text{чд}}(p)K_{\text{в1}}(p)K_{\text{и}}(p)K_{\text{г}}(p)\Delta\omega_{\text{пр}}(p) + \\ &+ K_c(p)K_{\text{в1}}(p)K_{\text{и}}(p)K_{\text{г}}(p)\Delta\omega_c(p). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Исключив из системы $\Delta\omega_r(t)$, получим

$$\begin{aligned} \Delta\omega_c(p) - \Delta\omega_{\text{пр}}(p) &= \\ &= K_{\text{чд}}(p)K_{\text{в1}}(p)K_{\text{и}}(p)K_{\text{г}}(p)\Delta\omega_{\text{пр}}(p) + K_c(p)K_{\text{в1}}(p)K_{\text{и}}(p)K_{\text{г}}(p)\Delta\omega_c(p), \\ [1 + K_{\text{чд}}(p)K_{\text{в1}}(p)K_{\text{и}}(p)K_{\text{г}}(p)]\Delta\omega_{\text{пр}}(p) &= [1 - K_c(p)K_{\text{в1}}(p)K_{\text{и}}(p)K_{\text{г}}(p)]\Delta\omega_c(p). \end{aligned} \quad (3)$$

Согласно (3) передаточная функция комбинированной системы ЧАП по ошибке равна

$$K_{\Delta\omega_{\text{пр}}}(p) = \frac{\Delta\omega_{\text{пр}}(p)}{\Delta\omega_c(p)} = \frac{1 - K_c(p)K_{\text{в1}}(p)K_{\text{и}}(p)K_{\text{г}}(p)}{1 + K_{\text{чд}}(p)K_{\text{в1}}(p)K_{\text{и}}(p)K_{\text{г}}(p)} = \frac{D_{\omega_{\text{пр}}}(p)}{F_{\omega_{\text{пр}}}(p)}. \quad (4)$$

Подставив в (4) значение передаточной функции $K_i(p) = \frac{D_i(p)}{F_i(p)}$, получим

$$\begin{aligned} K_{\Delta\omega_{\text{пр}}}(p) &= \frac{\Delta\omega_{\text{пр}}(p)}{\Delta\omega_c(p)} = \frac{1 - \frac{D_c(p)}{F_c(p)} \cdot \frac{D_{\text{в1}}(p)}{F_{\text{в1}}(p)} \cdot \frac{D_{\text{и}}(p)}{F_{\text{и}}(p)} \cdot \frac{D_{\text{г}}(p)}{F_{\text{г}}(p)}}{1 + \frac{D_{\text{чд}}(p)}{F_{\text{чд}}(p)} \cdot \frac{D_{\text{в1}}(p)}{F_{\text{в1}}(p)} \cdot \frac{D_{\text{и}}(p)}{F_{\text{и}}(p)} \cdot \frac{D_{\text{г}}(p)}{F_{\text{г}}(p)}}} \\ &= \frac{[F_c(p)F_{\text{в1}}(p)F_{\text{и}}(p)F_{\text{г}}(p) - D_c(p)D_{\text{в1}}(p)D_{\text{и}}(p)D_{\text{г}}(p)]F_{\text{чд}}(p)}{[F_{\text{чд}}(p)F_{\text{в1}}(p)F_{\text{и}}(p)F_{\text{г}}(p) + D_{\text{чд}}(p)D_{\text{в1}}(p)D_{\text{и}}(p)D_{\text{г}}(p)]F_c(p)} = \frac{D_{\omega_{\text{пр}}}(p)}{F_{\omega_{\text{пр}}}(p)}. \end{aligned} \quad (5)$$

После подстановки в (5) значений передаточных функций элементов, получим передаточную функцию системы

$$K_{\Delta\omega_{\text{пр}}}(p) = \frac{\Delta\omega_{\text{пр}}(p)}{\Delta\omega_c(p)} = \frac{[F_c(p)(T_{\text{г}}p + 1)p - D_c(p)k_{\text{в1}}k_{\text{и}}k_{\text{г}}](T_{\text{чд}}p + 1)}{[(T_{\text{чд}}p + 1)p(T_{\text{г}}p + 1) + k_{\text{в1}}k_{\text{и}}k_{\text{г}}k_{\text{чд}}]F_c(p)} = \frac{D_{\omega_{\text{пр}}}(p)}{F_{\omega_{\text{пр}}}(p)}. \quad (6)$$

В соответствии с (6) условием абсолютной инвариантности ошибки $\Delta\omega_{\text{пр}}$ относительно возмущающего воздействия $\Delta\omega_c$ является выражение

$$F_c(p)(T_{\text{г}}p + 1)p - D_c(p)k_{\text{в1}}k_{\text{и}}k_{\text{г}} = 0. \quad (7)$$

Выясним, возможен ли выбор $D_c(p)$ и $F_c(p)$ в соответствии с условием инвариантности (7) с точки зрения устойчивости системы.

Из сравнения условия инвариантности (7) и характеристического уравнения комбинированной системы

$$[(T_{\text{г}}p + 1)(T_{\text{чд}}p + 1)p + k_p]F_c(p) = 0, \quad (8)$$

где $k_p = k_{\text{в1}}k_{\text{и}}k_{\text{г}}$ – 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 (7), так и в характеристическое уравнение (8). Из формулы (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 $F_c(p) = 0$. Эти корни 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 $\Delta\omega_{np}$ относительно $\Delta\omega_c$ и условием устойчивости.

В соответствии с условием абсолютной инвариантности (6.7) передаточная функция связи по возмущающему воздействию должна быть равна

$$K_c(p) = \frac{D_c(p)}{F_c(p)} = \frac{(T_I p + 1)p}{k_{v1} k_{II} k_G}. \quad (9)$$

Как видно из (9), передаточная функция связи по возмущающему воздействию $K_c(p)$, соответствующая абсолютной инвариантности, физически не реализуема (степень числителя больше степени знаменателя) и 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.

8. Выводы

Таким образом, комбинированной системы ЧАП с астатизмом второго порядка и повышенным быстродействием введение связи по возмущающему воздействию $\Delta\omega_c$ не влияет на устойчивость замкнутого контура системы и поэтому параметры этой связи могут быть синтезированы в соответствии с требованиями повышения динамической точности системы.

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.

Список использованной литературы (ДСТУ)

1. Зайцев Г. Ф. Анализ динамических характеристик статической системы частотной автоподстройки с принципом управления по отклонению / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, О. Н. Гниденко, Н. В. Градобоева // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2012. – Т.10, №2. – С. 10-17.
2. Зайцев Г. Ф. Комбинированная система ЧАП с астатизмом первого порядка и повышенным быстродействием. Функциональная схема и математическая модель системы / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, О. Н. Гниденко, Т. В. Бурсова // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2012. – Т.10, №3. – С. 25-28.

3. Зайцев Г. Ф. Показатели качества комбинированной системы ЧАП с астатизмом первого порядка и повышенным быстродействием / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, О. Н. Гниденко, Н. В. Градобоева // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2012. – Т10, №4. – С. 9-13.

4. Зайцев Г. Ф. Система частотной автоподстройки с астатизмом первого порядка с принципом управления по отклонению / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, О. Н. Гниденко, Н. В. Градобоева // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2013. – №1. – С. 67-74.

5. Зайцев Г. Ф. Радиотехнические системы автоматического управления высокой точности / Г. Ф. Зайцев, В. К. Стеклов. – Київ: Техніка, 1988. – 160 с.

References (MLA)

1. Zaitsev G. F., Bulgach V. L., Gnidenko O. N., Gradoboieva N. V. "Analysis of Dynamic Descriptions of Static System of the Frequency Self-Tuning with a Deviation Principle Controls." *Visnyk Derzhavnoho Universytetu Informatsiino-Komunikatsiinykh Tekhnolohii*. 10(2) (2012): 10-17. Print.

2. Zaitsev G. F., Bulgach V. L., Gnidenko O. N., Bursova T. V. "The Combined System of the Automatic Frequency Control with the First Order Astatism. Functional Scheme, Mathematical Model of the System." *Visnyk Derzhavnoho Universytetu Informatsiino-Komunikatsiinykh Tekhnolohii*. 10(3) (2012): 25-28. Print.

3. Zaitsev H. F., Bulgach V. L., Gnidenko O. N., Gradoboieva N. V. "Quality Factors of the Combined System of the Automatic Frequency Control with the First Order Astatism and the Increased Speed." *Visnyk Derzhavnoho Universytetu Informatsiino-Komunikatsiinykh Tekhnolohii*. 10(4) (2012): 9-13. Print.

4. Zaitsev H. F., Bulgach V. L., Gnidenko O. N., Gradoboieva N. V. "The Automatic Frequency Control System with a Principle Controls by Deviation and the First Order Astatism." *Visnyk Derzhavnoho Universytetu Informatsiino-Komunikatsiinykh Tekhnolohii* 1 (2013): 67-74. Print.

5. Zaitsev H. F., Steklov V. K. *Radio Engineering Systems of High Precision Automatic Control*. Kyiv: –Tekhnika, 1988. Print.

Автори статті (Authors of the article)

Гніденко Олег Миколайович – начальник сектора автоматизації радіочастотного моніторингу (Gnidenko Oleh Mykolaiovych – Head of Radio Frequency Monitoring Automation Division). Phone: +380 44 422 8083. E-mail: olnik@ucrf.gov.ua.

Гніденко Микола Петрович – к.т.н., професор кафедри комп'ютерних наук (Gnidenko Mykola Petrovych – PhD in Ttechnics, Professor of Computer Science Department). Phone: +380 50 913 5252. E-mail: askorpam@ukr.net.

Льїн Олег Олександрович – д.т.н., професор кафедри комп'ютерних наук (Lyin Oleh Oleksandrovyuch – Dr.Sci. in Ttechnics, Professor of Computer Science Department). Phone: +380 67 901 0303. E-mail: olegka.ua@gmail.com.