

Кривошеев Владимир Петрович

Кан Борис Анатольевич

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Владивосток. Россия

Сравнительная оценка параметрического синтеза аналоговых и цифровых комбинированных систем управления

В основе расчета комбинированных систем автоматического регулирования (АСР) лежит принцип инвариантности, который справедлив и для цифровых систем управления. Однако передаточные функции компенсирующих и развязывающих устройств, полученные из условий инвариантности, зачастую физически нереализуемы.

Ключевые слова и словосочетания: системы управления, развязывающие устройства, компенсаторы, частотный метод, амплитудно-фазовая характеристика.

Комбинированные системы находят широкое применение при управлении объектами в различных отраслях промышленности, например, в нефтепереработке и нефтехимии [1], теплоэнергетике [2] и др. В этих системах реализуются базовые принципы управления – по отклонению и по возмущению. Структурная схема комбинированной системы приведена на рис. 1.

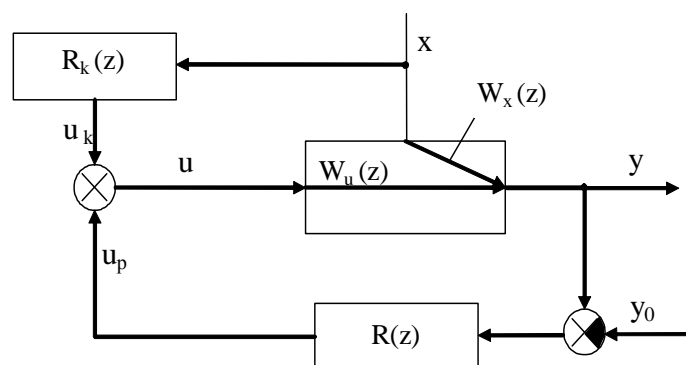


Рис. 1. Структурная схема комбинированной системы управления

Эффективность такой системы достигается за счёт компенсации основных измеряемых возмущающих воздействий. При этом упрощается процесс достижения регулируемой переменной заданного значения регулятором, установленным в цепи обратной связи. Параметрический синтез такой системы включает в себя определение рабочей частоты системы и опти-

мальных настроечных параметров выбранного регулятора, а затем определение типа компенсатора и его настроечных параметров. Известны графо-аналитический [3] и аналитический [4, 5, 6] методы параметрического синтеза реальных компенсирующих и развязывающих аналоговых устройств. В качестве таких устройств рассматриваются реальные дифференцирующие, интегро-дифференцирующие и неминимальнофазовые динамические звенья.

Ранее нами предложен частотный метод параметрического синтеза типовых регуляторов в дискретной форме [7, 8] для одноконтурных цифровых систем управления (ЦСУ).

В настоящей статье ставится задача исследования возможности применения алгоритмов параметрического синтеза аналоговых компенсаторов при вычислении параметров дискретных компенсаторов для ЦСУ.

Для каждого вида реального компенсатора рассматриваются возможные случаи наилучшей компенсации возмущающего воздействия, добиваясь выполнения условий:

$$W_k(j \cdot 0) - W_k^P(j \cdot 0) = 0, \quad (1)$$

$$W_k(j \cdot \omega_p) - W_k^P(j \cdot \omega_p) = 0; \quad (2)$$

или

$$W_k(j \cdot 0) - W_k^P(j \cdot 0) = 0, \quad (3)$$

$$W_k(j \cdot \omega_p) - W_k^P(j \cdot \omega_p) \rightarrow \min_{\vec{a}, \vec{b}}; \quad (4)$$

или

$$W_k(j \cdot 0) - W_k^P(j \cdot 0) \rightarrow \min_{\vec{a}, \vec{b}}, \quad (5)$$

$$W_k(j \cdot \omega_p) - W_k^P(j \cdot \omega_p) = 0, \quad (6)$$

где $W(j\omega)$, $W_k^P(j\omega)$ – амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) соответственно идеального и реального компенсатора или развязывающего устройства;

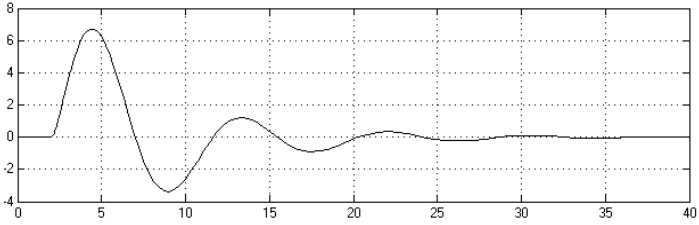
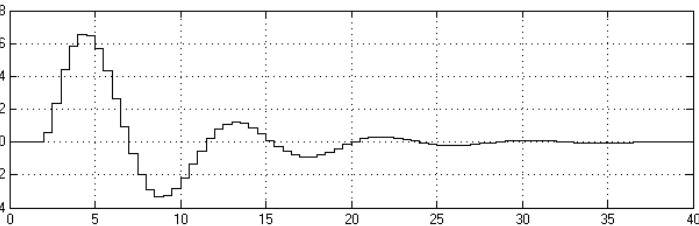
\vec{a} , \vec{b} – векторы параметров выбранного типа реального компенсатора или развязывающего устройства.

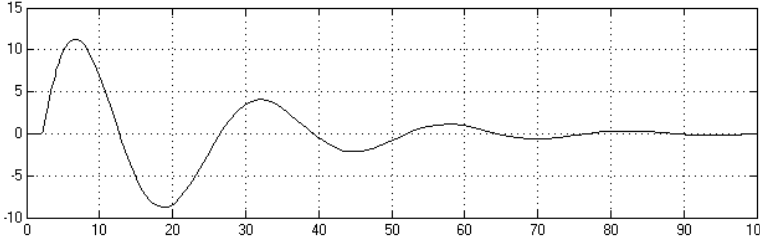
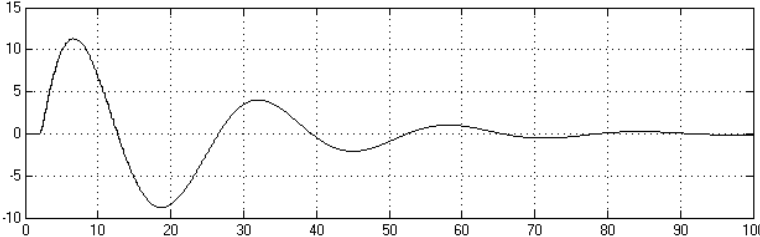
Условия (3) и (4), (5) и (6) выражают максимально возможное приближение АФХ идеального и реального компенсатора или развязывающего устройства на частоте $\omega_0 = 0$ и на рабочей частоте ω_p . При этом компенсация возмущения на нулевой частоте обеспечивает инвариантность системы в установившихся статических режимах.

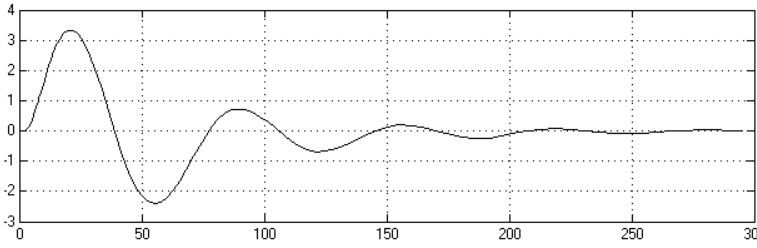
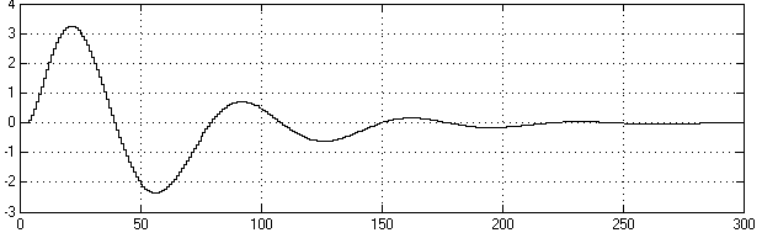
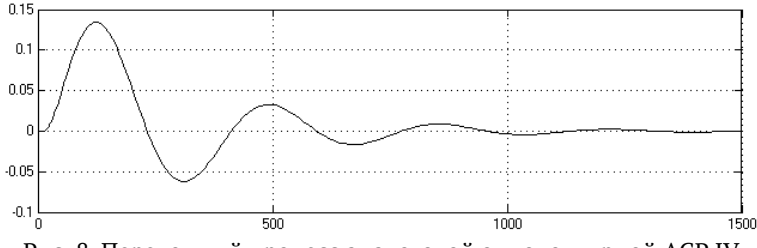
На рисунках 2–13 в табл. 1 приведены переходные процессы в одноконтурных аналоговых и цифровых системах управления, а на рис. 14–29

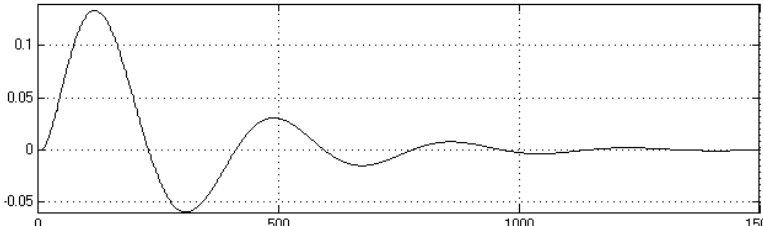
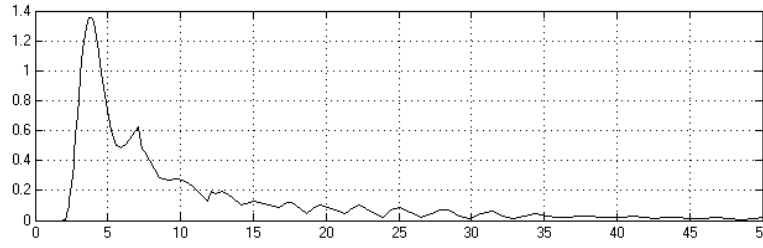
в табл. 2 приведены переходные процессы в комбинированных аналоговых и цифровых системах управления. Шаг квантования по времени определялся согласно рекомендациям [9]. Расчёт параметров дискретных компенсирующих устройств выполнялся по тем же алгоритмам, что и для аналоговых компенсирующих устройств [4–6]. Переход от передаточных функций типовых аналоговых компенсирующих устройств к дискретным выполнялся по Тастину [9]. При построении АФХ дискретных компенсаторов выполнялся переход от псевдочастоты к круговой частоте.

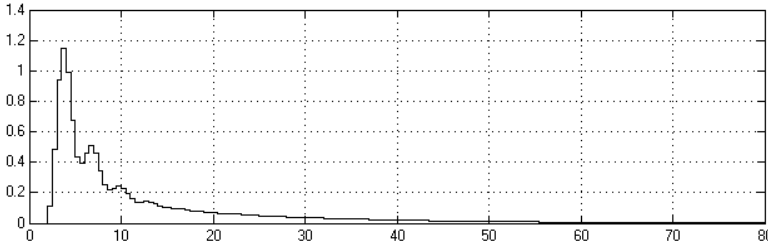
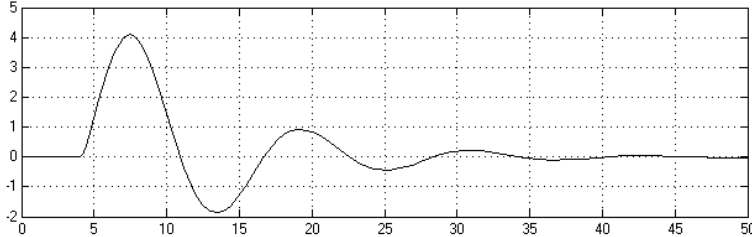
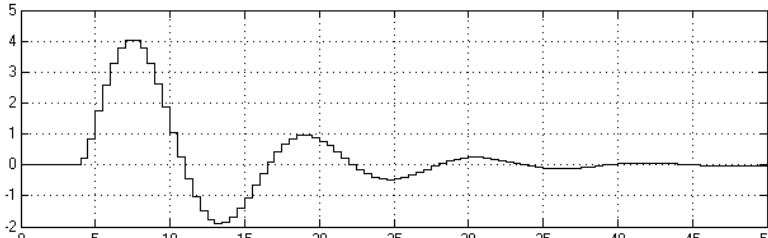
Таблица 1

Рассматриваемые системы		
№	Тип АСР	Показатели качества переходного процесса
1	2	3
I	Одноконтурная аналоговая	$W_{oy}(s) = \frac{30 \cdot e^{-0.5 \cdot s}}{10 \cdot s^2 + 10 \cdot s + 1}$ $W_{os}(s) = \frac{20 \cdot e^{-s}}{s^2 + 4 \cdot s + 1}$ $R(s) = \frac{0.237 \cdot s + 0.061}{s}$  <p style="text-align: center;">Рис. 2. Переходный процесс аналоговой одноконтурной АСР I $\omega_p = 0.733$ рад/сек.; $A_1 = 6.7$; $A_3 = 1.2$; $\psi = 0.8209$; $t_{pez} = 30$</p>
	Одноконтурная цифровая	$W_{oy}(z) = 0.14925 \frac{(z+1)^2}{z^2 - 1.5821 \cdot z + 0.60199788} \cdot z^{-1}$ $W_{os}(z) = 0.60606 \frac{(z+1)^2}{z^2 - 0.90905 \cdot z + 0.03029769} \cdot z^{-1}$ $R(z) = \frac{0.2563 \cdot z - 0.25638}{z - 1}$  <p style="text-align: center;">Рис. 3. Переходный процесс цифровой одноконтурной АСР I $\omega_p = 0.7725$ рад/сек.; $A_1 = 6.55$; $A_3 = 1.22$; $\psi = 0.8137$; $t_{pez} = 30$</p>

1	2	3
II	Одноконтурная аналоговая	$W_{oy}(s) = \frac{30 \cdot e^{-0.5 \cdot s}}{100 \cdot s^2 + 30 \cdot s + 1}$ $W_{ov}(s) = \frac{20 \cdot e^{-s}}{s^2 + 4 \cdot s + 1}$ $R(s) = \frac{0.242 \cdot s + 0.032}{s}$  <p data-bbox="544 768 1265 801">Рис. 4. Переходный процесс аналоговой одноконтурной АСР II</p> <p data-bbox="515 815 1070 846">$\omega_p=0.24 \text{ рад/сек.}; A_1=11.3; A_3=4; \psi=0.646; t_{pez}=80$</p>
	Одноконтурная цифровая	$W_{oy}(z) = 0.007389 \frac{(z+1)^2}{z^2 - 1.9704 \cdot z + 0.97049804} \cdot z^{-5}$ $W_{ov}(z) = 0.04158 \frac{(z+1)^2}{z^2 - 1.6591 \cdot z + 0.6674028} \cdot z^{-10}$ $R(z) = \frac{0.2432 \cdot z - 0.24}{z-1}$  <p data-bbox="544 1350 1254 1384">Рис. 5. Переходный процесс цифровой одноконтурной АСР II</p> <p data-bbox="515 1397 1102 1429">$\omega_p=0.24 \text{ рад/сек.}; A_1=11.28; A_3=3.9; \psi=0.654; t_{pez}=80$</p>
III	Одноконтурная аналоговая	$W_{oy}(s) = 2 \cdot \frac{e^{-0.2 \cdot s}}{10000 \cdot s^2 + 570 \cdot s + 1}$ $W_{ov}(s) = \frac{10 \cdot e^{-2.2 \cdot s}}{100 \cdot s^2 + 25 \cdot s + 1}$ $R(s) = \frac{45.181 \cdot s + 0.655}{s}$

1	2	3
		 <p data-bbox="523 521 1283 589">Рис. 6. Переходный процесс аналоговой одноконтурной АСР III $\omega_p=0.09$ рад/сек.; $A_1=3.33$; $A_3=0.7$; $\psi=0.7898$; $t_{pez}=225$</p>
	<p data-bbox="368 595 491 685">Одноконтурная цифровая</p> $W_{oy}(z) = 0.000048613 \cdot \frac{(z+1)^2}{z^2 - 1.9445 \cdot z + 0.94459666}$ $W_{os}(z) = 0.022173 \cdot \frac{(z+1)^2}{z^2 - 1.7594 \cdot z + 0.7782184} \cdot z^{-2}$ $R(z) = \frac{48.82 \cdot z - 45.09}{z-1}$	 <p data-bbox="523 1111 1283 1171">Рис. 7. Переходный процесс цифровой одноконтурной АСР III $\omega_p=0.09$ рад/сек.; $A_1=3.25$; $A_3=0.7$; $\psi=0.78461$; $t_{pez}=225$</p>
IV	<p data-bbox="368 1178 491 1301">Одноконтурная аналоговая</p> $W_{oy}(s) = 0.849 \cdot \frac{(-47.52 \cdot s + 1) \cdot e^{-0.03 \cdot s}}{4142 \cdot s^2 + 135 \cdot s + 1}$ $W_{os}(s) = 0.172 \cdot \frac{(2.32 \cdot s + 1) \cdot e^{-s}}{1555 \cdot s^2 + 86 \cdot s + 1}$ $R(s) = \frac{1.473 \cdot s + 0.016}{s}$	 <p data-bbox="523 1671 1283 1731">Рис. 8. Переходный процесс аналоговой одноконтурной АСР IV $\omega_p=0.0171$ рад/сек.; $A_1=0.134$; $A_3=0.033$; $\psi=0.7537$; $t_{pez}=1050$</p>

1	2	3
	<p>Одноконтурная цифровая</p>	$W_{oy}(z) = -0.0047414 \frac{(z-1.021) \cdot (z+1)}{(z-0.9887) \cdot (z-0.979)}$ $W_{oe}(z) = 0.00015174 \frac{z^2 + 0.3546 \cdot z - 0.6454}{z^2 - 1.9456 \cdot z + 0.94622535} \cdot z^{-2}$ $R(z) = \frac{1.495 \cdot z - 1.479}{z-1}$  <p>Рис. 9. Переходный процесс цифровой одноконтурной АСР IV $\omega_p=0.0171$ рад/сек.; $A_1=0.133$; $A_3=0.031$; $\psi=0.76691$; $t_{pez}=1050$</p>
V	<p>Одноконтурная аналоговая</p>	$W_{oy}(s) = 200 \cdot \frac{e^{-0.5 \cdot s}}{10 \cdot s + 1}$ $W_{oe}(s) = 100 \cdot \frac{e^{-s}}{50 \cdot s^2 + 20 \cdot s + 1}$ $R(s) = \frac{0.082 \cdot s + 0.067}{s}$  <p>Рис. 10. Переходный процесс аналоговой одноконтурной АСР V $\omega_p=2$ рад/сек.; $A_1=1.35$; $A_3=0.62$; $\psi=0.5407$; $t_{pez}=32$</p>
	<p>Одноконтурная цифровая</p>	$W_{oy}(z) = 4.878 \frac{(z+1)}{(z-0.9512)} \cdot z^{-1}$ $W_{oe}(z) = 0.11351 \cdot \frac{(z+1)^2}{z^2 - 1.8138 \cdot z + 0.81834597} \cdot z^{-2}$ $R(z) = \frac{0.1129 \cdot z - 0.07301}{z-1}$

1	2	3
		 <p data-bbox="547 521 1262 555">Рис. 11. Переходный процесс цифровой одноконтурной АСР V</p> <p data-bbox="515 568 1082 600">$\omega_p=2 \text{ рад/сек.}; A_1=1.146; A_3=0.51; \psi=0.555; t_{\text{пер}}=32$</p>
VI	<p data-bbox="368 607 485 725">Одноконтурная аналоговая</p> $W_{oy}(s) = 5 \cdot \frac{e^{-3 \cdot s}}{s^2 + 2 \cdot s + 1}$ $W_{об}(s) = 10 \cdot \frac{e^{-2.5 \cdot s}}{2 \cdot s + 1}$ $R(s) = \frac{0.084 \cdot s + 0.041}{s}$	 <p data-bbox="531 1104 1270 1137">Рис. 12. Переходный процесс аналоговой одноконтурной АСР VI</p> <p data-bbox="515 1151 1102 1182">$\omega_p=0.55 \text{ рад/сек.}; A_1=4.1; A_3=0.93; \psi=0.7732; t_{\text{пер}}=37$</p>
	<p data-bbox="368 1182 485 1279">Одноконтурная цифровая</p> $W_{oy}(z) = 1.1111 \frac{(z+1)}{(z-0.7778)} \cdot z^{-5}$ $W_{об}(z) = 0.2 \frac{(z+1)^2}{z^2 - 1.2 \cdot z + 0.36} \cdot z^{-6}$ $R(z) = \frac{0.09563 \cdot z - 0.97511}{z - 1}$	 <p data-bbox="531 1664 1270 1697">Рис. 13. Переходный процесс цифровой одноконтурной АСР VI</p> <p data-bbox="515 1711 1098 1742">$\omega_p=0.55 \text{ рад/сек.}; A_1=4.05; A_3=0.95; \psi=0.765; t_{\text{пер}}=37$</p>

Для количественной оценки качества переходного процесса в системах управления определены прямые показатели: ω_p – рабочая частота, A_1 – первая амплитуда, A_3 – третья амплитуда, ψ – степень затухания и $t_{рег}$ – время регулирования.

Таблица 2

Сравнительная оценка АФХ реальных компенсаторов в аналоговых и цифровых комбинированных АСР

Реальное дифференцирующее звено

$$W(s) = \frac{T_\epsilon}{T \cdot s + 1}$$

Тип АСР	Условия для расчета реального компенсатора	
1	2	3
Аналоговая комбинированная	Совпадение на нулевой и на рабочей частотах	$W_{p.к.}(0) = W_{u.д.к}(0);$ $W_{p.к.}(\omega_p) = W_{u.д.к}(\omega_p);$ $T_\epsilon = 16.890; \quad T = 1.740$

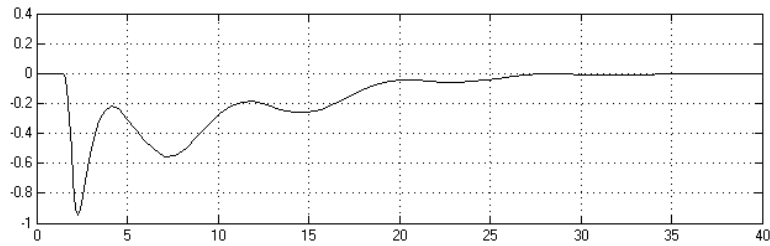


Рис. 14. Переходный процесс аналоговой комбинированной АСР I с реальным дифференцирующим звеном

Цифровая комбинированная	Совпадение на нулевой и на рабочей частотах	$W_{p.к.}(0) = W_{u.д.к}(0);$ $W_{p.к.}(\omega_p) = W_{u.д.к}(\omega_p);$ $T_\epsilon = 17.156; \quad T = 1.777$
--------------------------	---	--

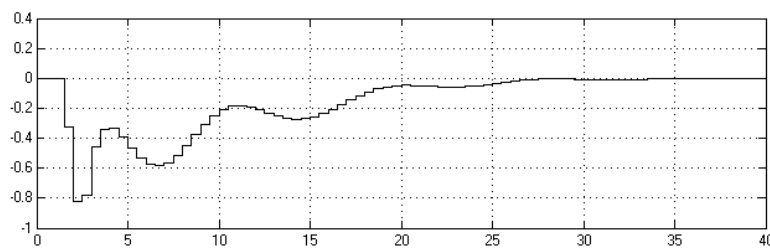
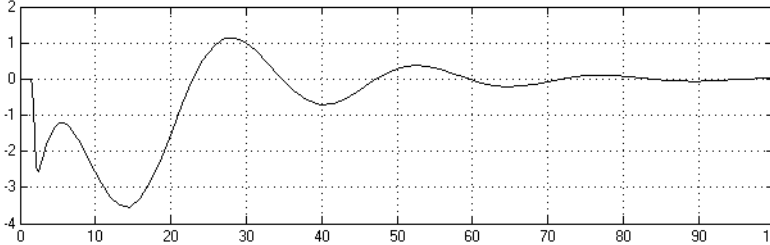
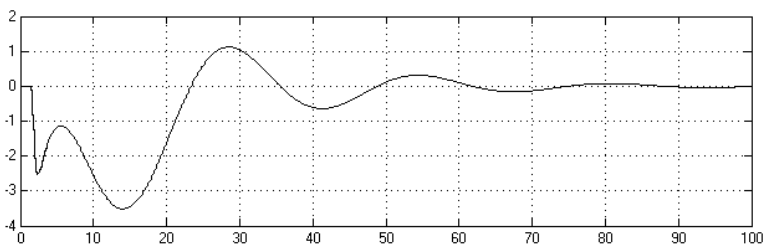
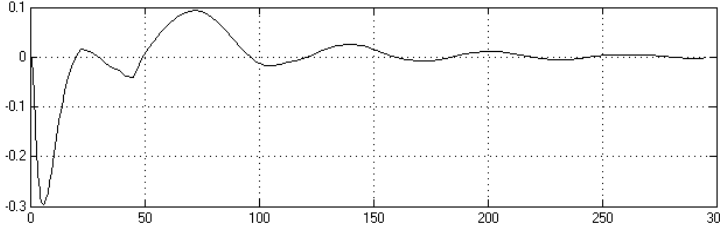
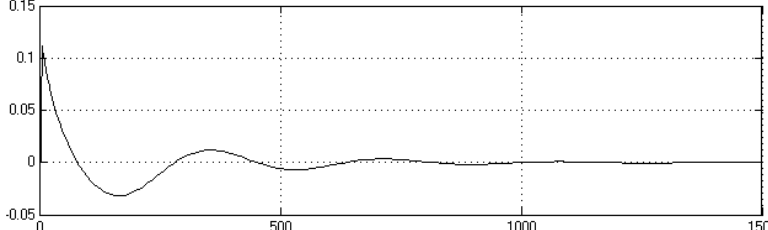
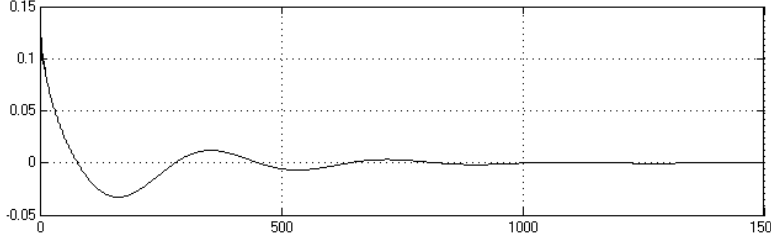
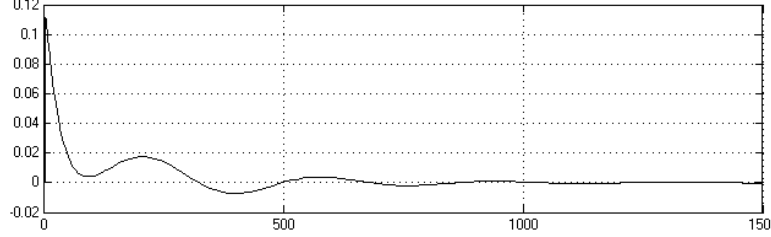
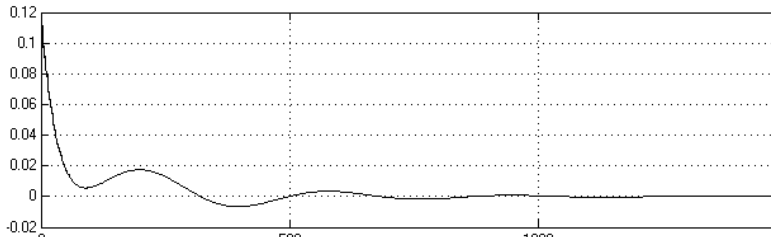


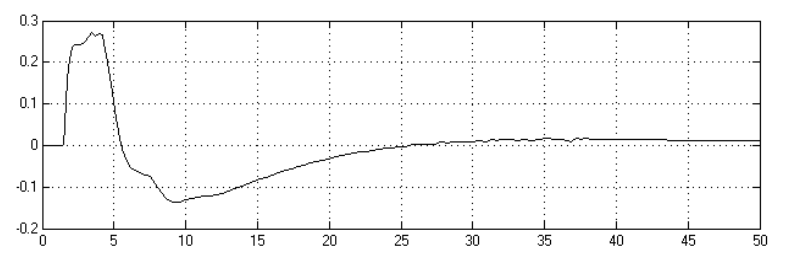
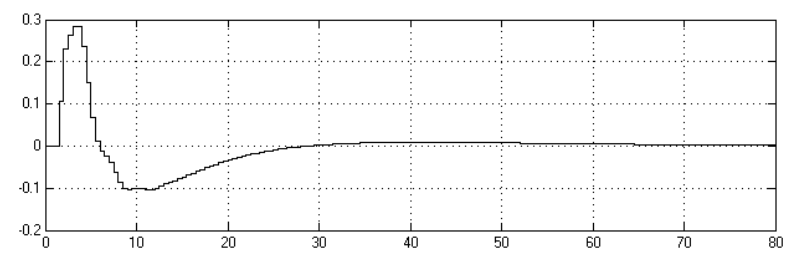
Рис. 15. Переходный процесс цифровой комбинированной АСР I с реальным дифференцирующим звеном

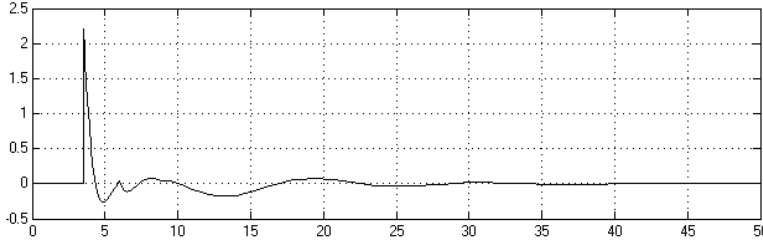
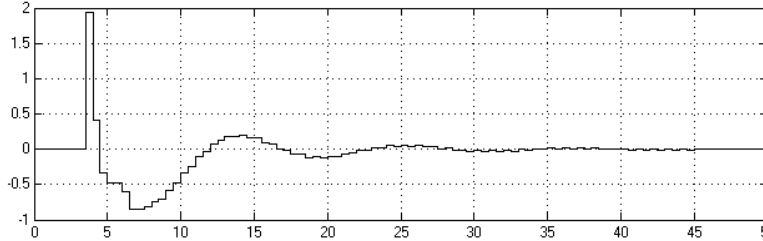
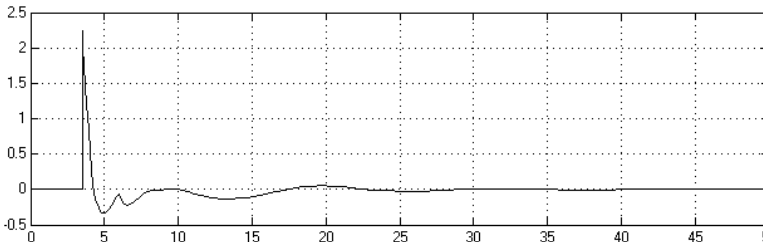
1	2	3
<p>Аналоговая комбинированная</p>	<p>Совпадение на нулевой и приближение на рабочей частотах</p>	$W_{p.к.}(0) = W_{u.д.к}(0);$ $W_{p.к.}(\omega_p) \longrightarrow W_{u.д.к}(\omega_p);$ $T_{\epsilon} = 62.418; \quad T = 0.062$
 <p data-bbox="518 696 1291 763">Рис. 16. Переходный процесс аналоговой комбинированной АСР II с реальным дифференцирующим звеном</p>		
<p>Цифровая комбинированная</p>	<p>Совпадение на нулевой и приближение на рабочей частотах</p>	$W_{p.к.}(0) = W_{u.д.к}(0);$ $W_{p.к.}(\omega_p) \longrightarrow W_{u.д.к}(\omega_p);$ $T_{\epsilon} = 62.216; \quad T = 0.062$
 <p data-bbox="518 1211 1291 1279">Рис. 17. Переходный процесс цифровой комбинированной АСР II с реальным дифференцирующим звеном</p>		
<p>Интегро-дифференцирующее звено</p> $W(s) = k \frac{T_B S + 1}{T S + 1}$		
<p>Аналоговая комбинированная</p>	<p>Совпадение на нулевой и на рабочей частотах</p>	$W_{p.к.}(0) = W_{u.д.к}(0);$ $W_{p.к.}(\omega_p) = W_{u.д.к}(\omega_p);$ $k = 5; \quad T_{\epsilon} = 62.216; \quad T = 0.062$

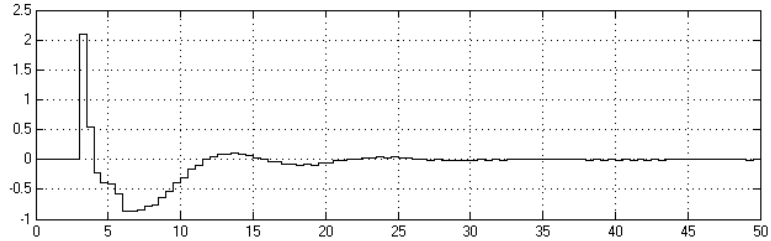
1	2	3
	 <p data-bbox="515 533 1286 593">Рис. 18. Переходный процесс аналоговой комбинированной АСР III с интегро-дифференцирующим звеном</p>	
<p data-bbox="300 607 485 667">Цифровая комбинированная</p>	<p data-bbox="515 607 865 667">Совпадение на нулевой и на рабочей частотах</p>	$W_{p.к.}(0) = W_{u.д.к.}(0);$ $W_{p.к.}(\omega_p) = W_{u.д.к.}(\omega_p);$ $k = 4.970; T_{\epsilon} = 589.925; T = 8.395$
<p data-bbox="300 1099 448 1182">Аналоговая комбинированная</p>	<p data-bbox="515 1099 865 1160">Совпадение на нулевой и приближение на рабочей частотах</p>	$W_{p.к.}(0) = W_{u.д.к.}(0);$ $W_{p.к.}(\omega_p) \rightarrow W_{u.д.к.}(\omega_p);$ $k = 0.202; T_{\epsilon} = 56.764; T = 0.056$
	 <p data-bbox="515 1541 1286 1601">Рис. 20. Переходный процесс аналоговой комбинированной АСР IV с интегро-дифференцирующим звеном</p>	

1	2	3
Цифровая комбинированная	Совпадение на нулевой и приближение на рабочей частотах	$W_{p.к.}(0) = W_{u.д.к}(0);$ $W_{p.к.}(\omega_p) \longrightarrow W_{u.д.к}(\omega_p);$ $k = 0.200; T_{\epsilon} = 57.246; T = 0.057$
 <p data-bbox="512 656 1286 712">Рис. 21. Переходный процесс цифровой комбинированной АСР IV с интегро-дифференцирующим звеном</p>		
Аналоговая комбинированная	Приближение на нулевой и совпадение на рабочей частотах	$W_{p.к.}(0) \longrightarrow W_{u.д.к}(0);$ $W_{p.к.}(\omega_p) = W_{u.д.к}(\omega_p);$ $k = 0.124; T_{\epsilon} = 92.749; T = 0.011$
 <p data-bbox="512 1155 1286 1211">Рис. 22. Переходный процесс аналоговой комбинированной АСР IV с интегро-дифференцирующим звеном</p>		
Цифровая комбинированная	Совпадение на рабочей и приближение на нулевой частотах	$W_{p.к.}(0) \longrightarrow W_{u.д.к}(0);$ $W_{p.к.}(\omega_p) = W_{u.д.к}(\omega_p);$ $k = 0.200; T_{\epsilon} = 95.453; T = 0.011$
 <p data-bbox="512 1659 1286 1715">Рис. 23. Переходный процесс цифровой комбинированной АСР IV с интегро-дифференцирующим звеном</p>		

Продолжение табл. 2

1	2	3
Неминимальнофазовое инерционное звено		
$W(s) = k \frac{1 - T_B S}{1 + TS}$		
Тип АСР	Условия для расчета реального компенсатора	
Аналоговая комбинированная	Совпадение на нулевой и на рабочей частотах	$W_{p.k.}(0) = W_{u.d.k.}(0);$ $W_{p.k.}(\omega_p) = W_{u.d.k.}(\omega_p);$ $k = 0.500; T_{\epsilon} = 0.645; T = 8.264$
 <p data-bbox="501 846 1294 920">Рис. 24. Переходный процесс аналоговой комбинированной АСР V с неминимальнофазовым звеном</p>		
Цифровая комбинированная	Совпадение на нулевой и на рабочей частотах	$W_{p.k.}(0) = W_{u.d.k.}(0);$ $W_{p.k.}(\omega_p) = W_{u.d.k.}(\omega_p);$ $k = 0.499; T_{\epsilon} = -0.655; T = 9.099;$
 <p data-bbox="501 1361 1294 1435">Рис. 25. Переходный процесс цифровой комбинированной АСР V с неминимальнофазовым звеном</p>		
Аналоговая комбинированная	Совпадение на нулевой и приближение на рабочей частотах	$W_{p.k.}(0) = W_{u.d.k.}(0);$ $W_{p.k.}(\omega_p) \rightarrow W_{u.d.k.}(\omega_p);$ $k = 0.500; T_{\epsilon} = 0.898; T = 0.001$

1	2	3
		<p>Рис. 26. Переходный процесс аналоговой комбинированной АСР VI с неминимальнофазовым звеном</p>
<p>Цифровая комбинированная</p>	<p>Совпадение на нулевой и приближение на рабочей частотах</p>	$W_{p.k.}(0) = W_{u.d.k.}(0);$ $W_{p.k.}(\omega_p) \longrightarrow W_{u.d.k.}(\omega_p);$ $k = 0.592; T_{\epsilon} = 0.991; T = 0.001$
		<p>Рис. 27. Переходный процесс цифровой комбинированной АСР VI с неминимальнофазовым звеном</p>
<p>Аналоговая комбинированная</p>	<p>Совпадение на рабочей и приближение на нулевой частотах</p>	$W_{p.k.}(0) \longrightarrow W_{u.d.k.}(0);$ $W_{p.k.}(\omega_p) = W_{u.d.k.}(\omega_p);$ $k = 0.515; T_{\epsilon} = 0.873; T = 8 \cdot 10^{-4}$
		<p>Рис. 28. Переходный процесс аналоговой комбинированной АСР VI с неминимальнофазовым звеном</p>

1	2	3
Цифровая комбинированная	Совпадение на рабочей и приближение на нулевой частотах	$W_{p.k.}(0) \rightarrow W_{u.d.k.}(0);$ $W_{p.k.}(\omega_p) = W_{u.d.k.}(\omega_p);$ $k = 0.5925; T_{\epsilon} = 1.0527; T = 1.052 \cdot 10^{-4};$
	 <p>Рис. 29. Переходный процесс цифровой комбинированной АСП VI с неминимальнофазовым звеном</p>	

Сравнительный анализ переходных процессов в аналоговых и цифровых системах управления подтверждает их идентичность. Также близки переходные процессы в комбинированных аналоговых и цифровых системах управления. Для сравнения результатов промежуточного этапа параметрического синтеза типовых компенсаторов в аналоговом и дискретном вариантах построены АФХ. Графики АФХ, приведенные на рис. 30–41 в табл. 3, также свидетельствуют о близости АФХ для аналоговых и дискретных идеальных компенсаторов.

Таблица 3

Значения АФХ рассматриваемых систем на рабочих частотах

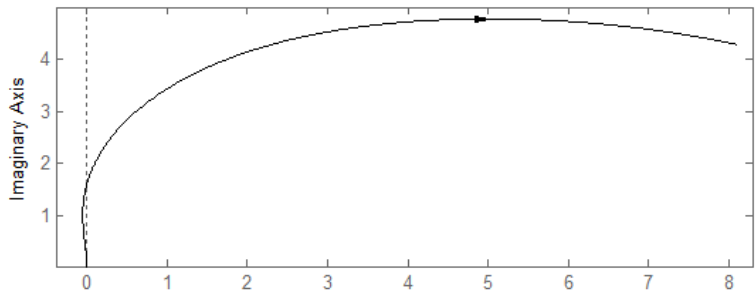
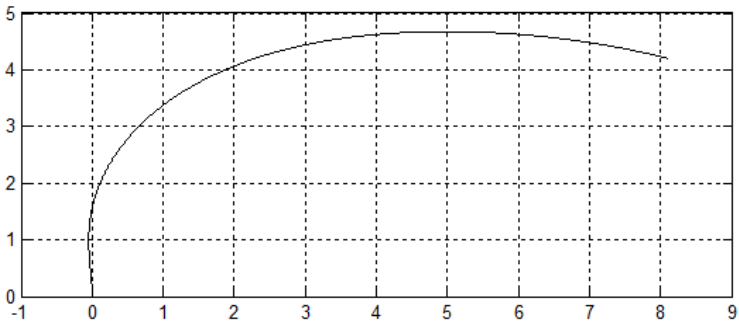
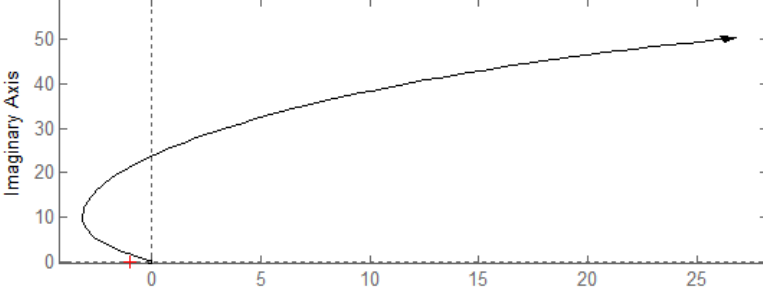
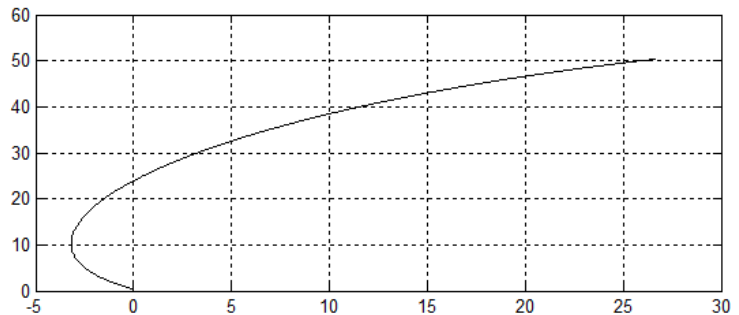
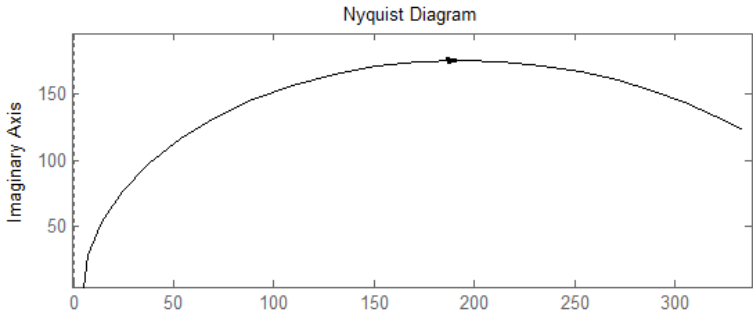
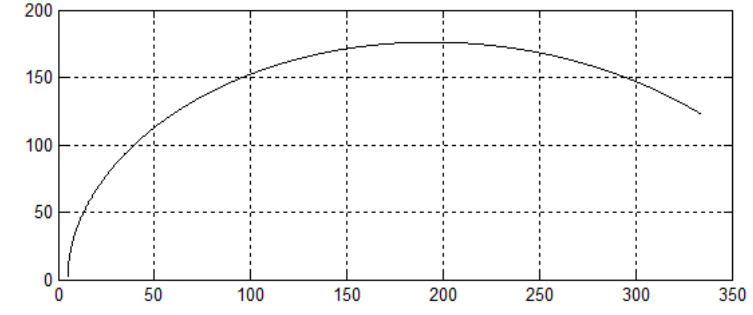
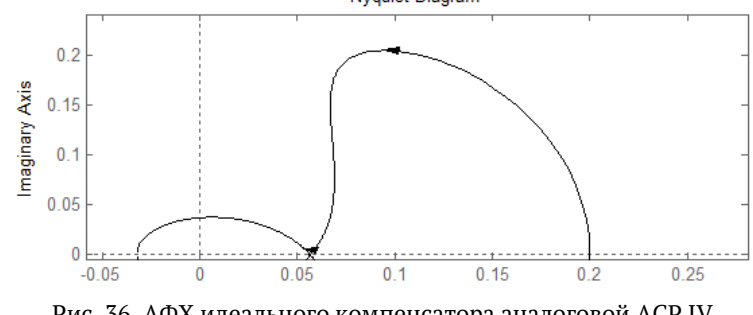
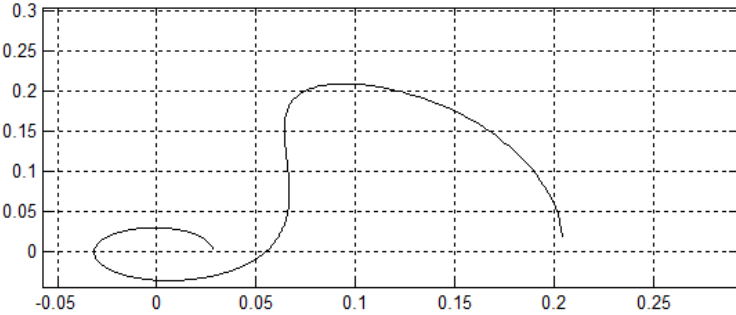
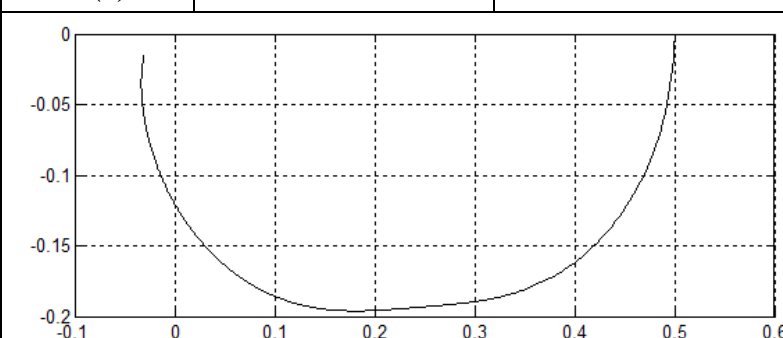
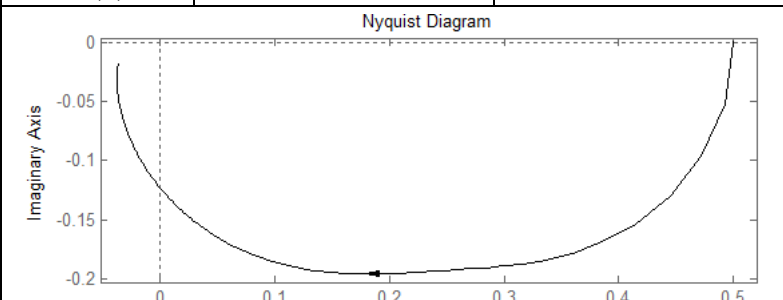
№	Тип АСП	Значения на контрольных частотах		
		3	4	5
1	2			
I	Аналоговая	$Re(\omega)$	$-5.685 \cdot 10^{-14}$	6.057
		$Im(\omega)$	$6.962 \cdot 10^{-30}$	4.715
Nyquist Diagram				
				

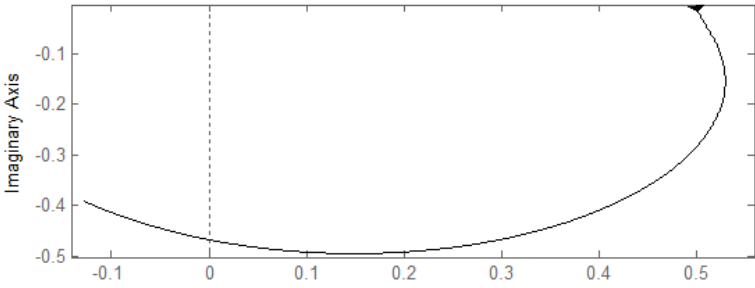
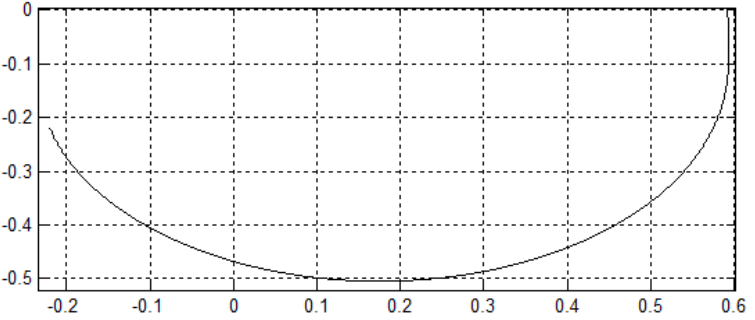
Рис. 30. АФХ идеального компенсатора аналоговой АСП I

1	2	3	4	5
1	Цифровая	$Re(\omega)$	0	6.310
		$Im(\omega)$	0	4.593
				
		Рис. 31. АФХ идеального компенсатора цифровой АСР I		
II	Аналоговая	$Re(\omega)$	$-1.12325 * 10^{-13}$	-2.682
		$Im(\omega)$	$1.37556 * 10^{-29}$	15.300
				
		Рис. 32. АФХ идеального компенсатора аналоговой АСР II		
	Цифровая	$Re(\omega)$	0	-2.707
		$Im(\omega)$	0	15.251
				
		Рис. 33. АФХ идеального компенсатора цифровой АСР II		

1	2	3	4	5
III	Аналоговая	$Re(\omega)$	4.999	130
		$Im(\omega)$	0	165
	 <p>Рис. 34. АФХ идеального компенсатора аналоговой АСР III</p>			
IV	Цифровая	$Re(\omega)$	4.970	130.070
		$Im(\omega)$	0	165.570
	 <p>Рис. 35. АФХ идеального компенсатора цифровой АСР III</p>			
IV	Аналоговая	$Re(\omega)$	0.200	0.123
		$Im(\omega)$	0	0.194
	 <p>Рис. 36. АФХ идеального компенсатора аналоговой АСР IV</p>			
IV	Цифровая	$Re(\omega)$	0.200	0.122
		$Im(\omega)$	0	0.199

1	2	3	
		 <p data-bbox="576 589 1230 618">Рис. 37. АФХ идеального компенсатора цифровой АСР IV</p>	
V	Аналоговая	$Re(\omega)$	0.500
		$Im(\omega)$	-0.037
	Цифровая	$Re(\omega)$	0.499
		$Im(\omega)$	-0.029
	Аналоговая	$Re(\omega)$	0.514
		$Im(\omega)$	-0.247



1	2	3	
		 <p data-bbox="571 566 1249 600">Рис. 40. АФХ идеального компенсатора аналоговой АСР VI</p>	
Цифровая		$Re(\omega)$	0.499 0.525
		$Im(\omega)$	0 -0.323
		 <p data-bbox="571 1014 1249 1048">Рис. 41. АФХ идеального компенсатора цифровой АСР VI</p>	

При параметрическом синтезе цифровых комбинированных систем управления с типовыми компенсаторами справедливы алгоритмы определения параметров аналоговых компенсаторов.

1. Дудников, Е.Г. Автоматическое управление в химической промышленности / Е.Г. Дудников. – М.: Химия, 1987. – 368 с.
2. Стефани, Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / Е.П. Стефани. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.
3. Ротач, В.Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования / В.Я. Ротач. – М.; Л.: Энергоиздат, 1961. – 344 с.
4. Кривошеев, В.П. Аналитический метод расчета типовых компенсаторов и развязывающих устройств. I / В.П. Кривошеев, М.А. Сачко // Информатика и системы управления. – 2010. – №23. – С. 147-155.
5. Кривошеев, В.П. Аналитический метод расчета типовых компенсаторов и развязывающих устройств. II / В.П. Кривошеев, М.А. Сачко // Информатика и системы управления. – 2010. – №25. – С. 125-136.

6. Кривошеев, В.П. Аналитический метод расчета типовых компенсаторов и развязывающих устройств. III / В.П. Кривошеев, М.А. Сачко // Информатика и системы управления. – 2010. – №26. – С. 127-136.

7. Кривошеев, В.П. Метод параметрического синтеза цифровых систем управления на основе расширенных амплитудно-фазовых характеристик / В.П. Кривошеев, А.В. Епифанцев, Б.А. Кан // Информатика и системы управления. – 2012. – № 4. – С. 138-147.

8. Кривошеев, В.П. Параметрический синтез дискретного алгоритма ПИД – регулятора частотным методом / В.П. Кривошеев, Б.А. Кан // Информатика и системы управления. – 2013. – № 3. – С. 143-151.

9. Изерман, Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984.