

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	3
1.1 Исходная блочно-структурная схема (БСС)	3
1.2 Фактическая расчетная БСС	3
1.3 Заданные передаточные функции звеньев автоматики	4
2. РАСЧЕТ СКАЛЯРНЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ.....	6
2.1 РАСЧЕТ ПФ ПУТЕМ СТРУКТУРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИСХОДНОЙ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ	6
2.2 РАСЧЕТ ПФ ТОПОЛОГИЧЕСКИМ СПОСОБОМ (ПО ФОРМУЛЕ МЭЙСОНА)	9
2.3 РАСЧЕТ ПФ НА КОМПЬЮТЕРЕ.....	10
3. РАСЧЕТ НУЛЕЙ И ПОЛЮСОВ.....	12
4. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ (ПП).....	14
4.1 РАСЧЕТ ПП АНАЛИТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ	14
4.2 РАСЧЕТ ПП ГРАФИЧЕСКИМ СПОСОБОМ (ПО МЕТОДУ СОЛОДОВНИКОВА)	15
4.3 РАСЧЕТ ПП МАШИНЫМ СПОСОБОМ	19
5. ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ	21
5.1 ГОДОГРАФ ЧАСТОТНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ (ЧПФ) САУ	21
5.2 ФАЗО-ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА (ФЧХ) САУ	21
5.3 ЛОГАРИФИЧЕСКАЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА (ЛАЧХ) САУ	22
5.4 АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА (АЧХ) САУ	22
5.5 Вещественная частотная передаточная функция (ВЧПФ) САУ	22
5.6 Мнимая частотная передаточная функция (МЧПФ) САУ	23
6. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ САУ	24
6.1 Оценка устойчивости САУ по корням характеристического полинома ПФ	24
6.2 Оценка устойчивости САУ по критерию Гурвица	25
6.3 Оценка устойчивости САУ по методу Рауса	25
6.4 Оценка устойчивости САУ по Михайлову	26
6.5 Оценка устойчивости САУ методом D-разбиения	28
7. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА АВТОКОЛЕБАНИЙ В НЕЛИНЕЙНОЙ САУ	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	36

Подп. и дата.		Инв. № дубл.		Взам. Инв. №		Подп. и дата	
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<div>Курсовой проект</div> <div>Вариант №6</div> <div>Код 2.3</div> <div>Лит. 2 Лист 36</div> <div>КемГУ</div> <div>гр. АМ-061</div>	
	Выполнил	Дойкин Д.Е.					
	Проверил	Семенов А.Г.					
	Н. контр						
	Утв						

1. Исходные данные

1.1 Исходная блочно-структурная схема (БСС)

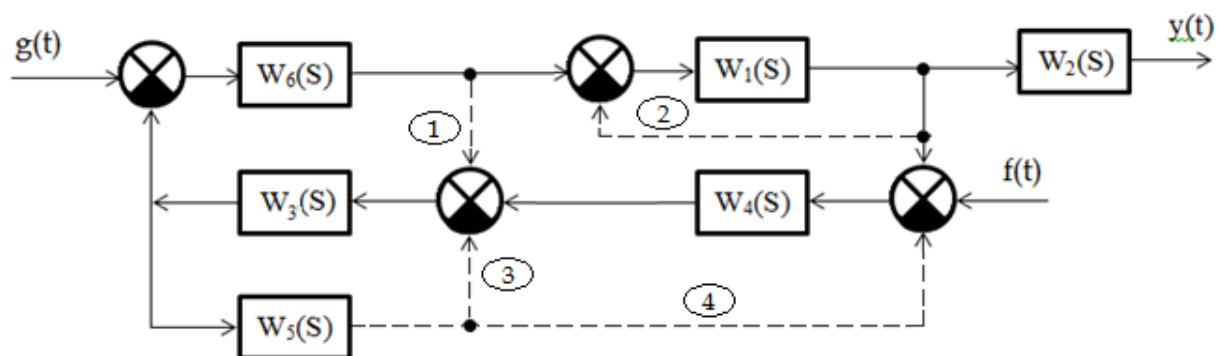


Рисунок 1.1. Исходная БСС.

1.2 Фактическая расчетная БСС

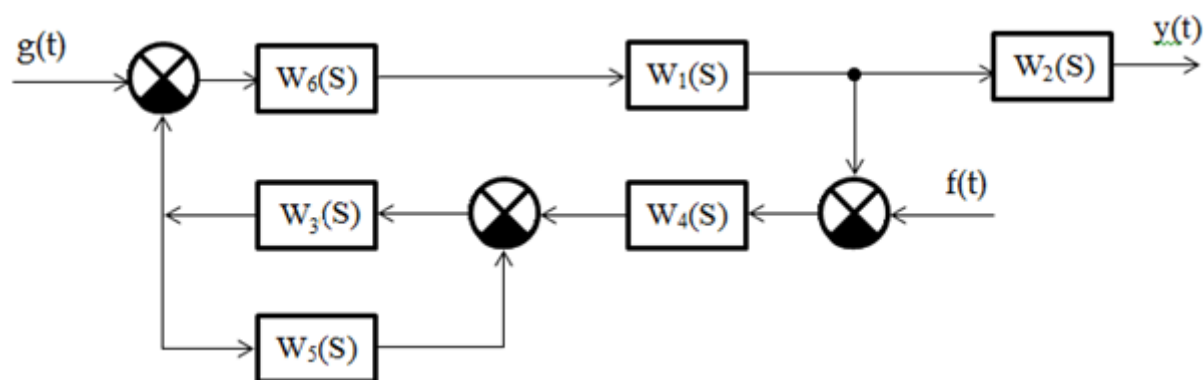


Рисунок 1.2. Фактическая расчетная БСС.

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам. Име. №	Име. № дубл.	Подп. и дата

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Лист
					3

1.3 Заданные передаточные функции звеньев автоматики

Таблица 1 – Характеристики звеньев

Номер звена	Характеристика звена								
1	$W_1(S) = k_1$								
2	$W_2(S) = \frac{k_2}{T_2 * S + 1}$								
3	$(T_3 * p + 1)y_3(t) = k_3 * x_3(t)$								
4	$y_4(t) = k_4 * \int_0^t x_4(t)dt$								
5	t	0	5	10	15	20	25	∞	
	$h_5(t)$	0	k_5	k_5	k_5	k_5	k_5	k_5	
6	$h_6(t) = k_6 * \left(1 - e^{-\frac{t}{T_6}}\right)$								

Таблица 2 –Численные значения параметров

Наименование параметра	Значение параметра	Наименование параметра	Значение параметра
k_1	4.2	k_6	1.0
k_2	9.3	T_6	1.25
T_2	0.6	X_{e1}	0.8
k_3	2.05	T_1	4.0
T_3	0.35	y_m	4.0
k_4	0.3	a	3.0
k_5	1.3		

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата					
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата					Лист
									4

1 звено:

$$W_1(S) = k_1 = 4.2$$

2 звено:

$$W_2(S) = \frac{k_2}{T_2 * S + 1} = \frac{9.3}{0.6 * S + 1}$$

3 звено:

$$W_3(S) = \frac{k_3}{T_3 * S + 1} = \frac{2.05}{0.35 * S + 1}$$

4 звено:

$$W_4(S) = \frac{k_4}{S} = \frac{0.3}{S}$$

5 звено:

$$W_5(S) = k_5 = 1.3$$

6 звено:

$$W_6(S) = \frac{k_6}{T_6 * S + 1} = \frac{1}{1.25 * S + 1}$$

Внешние воздействия

Задающее воздействие:

Оригинал: $g(t) = X_{e1} * e^{-t/T_1}$

Изображение: $g(S) = L\{X_{e1} * e^{-t/T_1}\} = \frac{3.2}{4*S+1}$

Возмущающее воздействие:

Оригинал: $f(t) = X_{e2} * e^{-t/T_2}$

Изображение: $f(S) = L\{X_{e2} * e^{-t/T_2}\} = \frac{4.4}{2.75*S+1}$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата					
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата					
					Лист				
					5				

2. Расчет скалярных передаточных функций

2.1 Расчет ПФ путем структурного преобразования исходной расчетной схемы

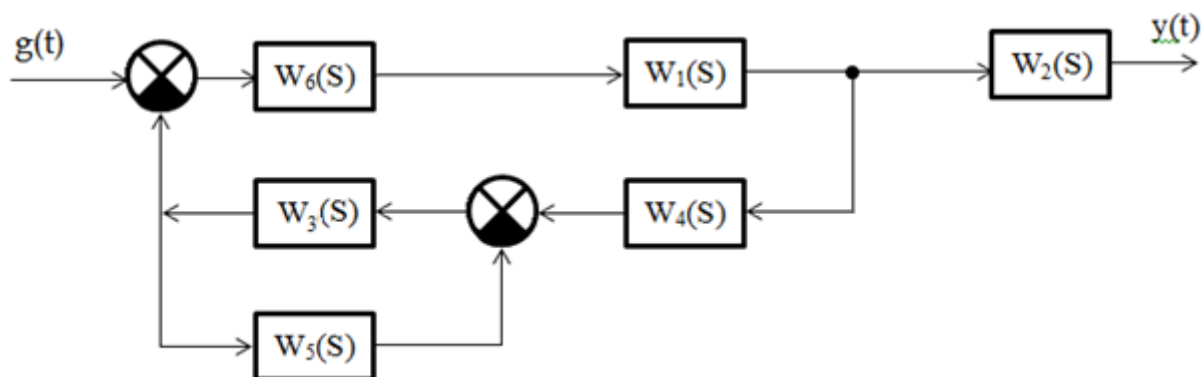


Рисунок 2.1. Исходная расчетная БСС.

Преобразуем соединение с обратной связью между ЗА с ПФ $W_3(S)$ и $W_5(S)$, исходная схема примет вид (рисунок 2.2):



Рисунок 2.2.

$$W_7(S) = \frac{W_3(S)}{1 + W_3(S) * W_5(S)}$$

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. Инв. №	Инв. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата
Ине. № подл.	Подп. и дата

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата
-----	------	---------	---------	------

Далее преобразуем соединения с линейной связью между ЗА с ПФ $W_6(S)$ и $W_1(S)$ и ЗА с ПФ $W_7(S)$ и $W_4(S)$, схема примет вид (рисунок 2.3):

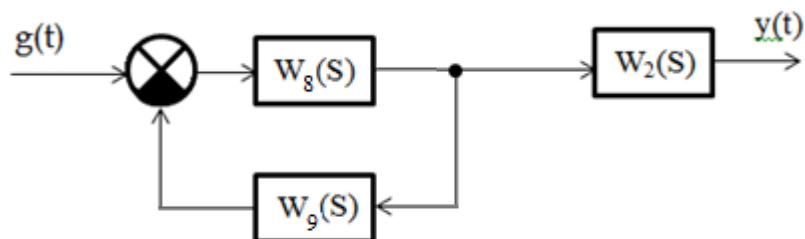


Рисунок 2.3.

$$W_8(S) = W_6(S) * W_1(S)$$

$$W_9(S) = W_7(S) * W_4(S) = \frac{W_3(S) * W_4(S)}{1 + W_3(S) * W_5(S)}$$

Преобразуем соединение с обратной связью между ЗА с ПФ $W_8(S)$ и $W_9(S)$, схема примет вид (рисунок 2.4):

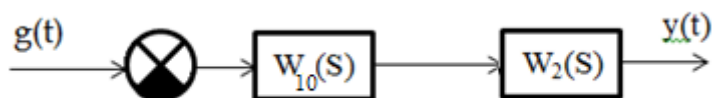
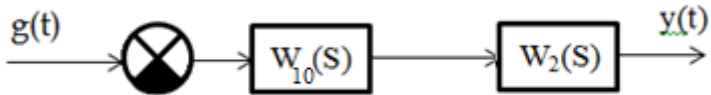


Рисунок 2.4.

$$\begin{aligned} W_{10}(S) &= \frac{W_8(S)}{1 + W_8(S) * W_9(S)} = \frac{W_6(S) * W_1(S)}{1 + \frac{W_6(S) * W_1(S) * W_3(S) * W_4(S)}{1 + W_3(S) * W_5(S)}} = \\ &= \frac{W_6(S) * W_1(S)}{\frac{1 + W_3(S) * W_5(S) + W_6(S) * W_1(S) * W_3(S) * W_4(S)}{1 + W_3(S) * W_5(S)}} = \\ &= \frac{W_6(S) * W_1(S) * (1 + W_3(S) * W_5(S))}{1 + W_3(S) * W_5(S) + W_6(S) * W_1(S) * W_3(S) * W_4(S)} \end{aligned}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата.					Лист 7
	Инв. № дубл.					
	Взам. Инв. №					
	Подп. и дата					
<p> $W_9(S)$, схема примет вид (рисунок 2.4): </p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Рисунок 2.4.</p> $ \begin{aligned} W_{10}(S) &= \frac{W_8(S)}{1 + W_8(S) * W_9(S)} = \frac{W_6(S) * W_1(S)}{1 + \frac{W_6(S) * W_1(S) * W_3(S) * W_4(S)}{1 + W_3(S) * W_5(S)}} = \\ &= \frac{W_6(S) * W_1(S)}{\frac{1 + W_3(S) * W_5(S) + W_6(S) * W_1(S) * W_3(S) * W_4(S)}{1 + W_3(S) * W_5(S)}} = \\ &= \frac{W_6(S) * W_1(S) * (1 + W_3(S) * W_5(S))}{1 + W_3(S) * W_5(S) + W_6(S) * W_1(S) * W_3(S) * W_4(S)} \end{aligned} $						
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

Остается преобразовать соединение с линейной связью между ЗА с ПФ $W_{10}(S)$ и $W_2(S)$, схема примет вид (рисунок 2.5):

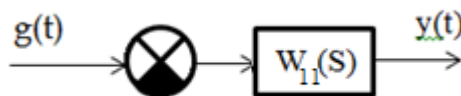


Рисунок 2.5.

$$\begin{aligned}
 W_{11}(S) &= W_{10}(S) * W_2(S) = \\
 &= \frac{W_6(S) * W_1(S) * (1 + W_3(S) * W_5(S))}{1 + W_3(S) * W_5(S) + W_6(S) * W_1(S) * W_3(S) * W_4(S)} * W_2(S) = \\
 &= \frac{W_2(S) * W_6(S) * W_1(S) * (1 + W_3(S) * W_5(S))}{1 + W_3(S) * W_5(S) + W_6(S) * W_1(S) * W_3(S) * W_4(S)}
 \end{aligned}$$

Полученную ПФ запишем в трех видах:

1) общая дробно-рациональная функция:

$$W(S) = \frac{W_2(S) * W_6(S) * W_1(S) * (1 + W_3(S) * W_5(S))}{1 + W_3(S) * W_5(S) + W_6(S) * W_1(S) * W_3(S) * W_4(S)}$$

2) в виде общих обозначений параметров ЗА САУ:

$$\begin{aligned}
 W(S) &= \frac{k_1 * k_2 * k_6 * T_3 * S^2 + k_1 * k_2 * k_3 * k_5 * k_6 * S + k_1 * k_2 * k_6 * S}{T_2 * T_3 * T_6 * S^4 + (k_3 * k_5 * T_2 * T_6 + T_2 * T_3 + T_2 * T_6 + T_3 * T_6) *} \\
 &\quad * S^3 + (k_3 * k_5 * T_2 + k_3 * k_5 * T_6 + T_2 + T_3 + T_6) * S^2 + (k_1 * k_3 * k_4 * k_6 * T_2 + \\
 &\quad + k_3 * k_5 + 1) * S + k_1 * k_3 * k_4 * k_6
 \end{aligned}$$

3) в числовой форме:

$$W(S) = \frac{13.67 * S^2 + 143.16 * S}{0.26 * S^4 + 3.4 * S^3 + 7.13 * S^2 + 5.22 * S + 2.58}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Лист
					8

2.2 Расчет ПФ топологическим способом (по формуле Мэйсона)

Формула Мейсона: $W(S)_{xy} = \frac{y(S)}{x(S)} = \frac{\sum_{i=1}^r H_i(S) * \Phi_i(S)}{\Phi(S)}$

где $H_i(S)$ - ПФ i-го канала;

r - число каналов;

$\Phi_i(S)$ – вырожденный определитель относительно i-того канала

$$\Phi(S) = 1 - \sum_{j=1}^{r_1} H_{ij}(S)$$

где $H_{ij}(S)$ - ПФ одиночного j-того контура в разомкнутом состоянии относительно i-того канала;

r_1 - число одиночных контуров.

Расчет ОСПФ:

1) В нашей схеме 1 канал ==> $r=1$:

$$i = 1; H_1(S) = W_1 * W_2 * W_6;$$

2) Контурь: 2 контура:

$$i = 1; H_{11}(S) = -W_1 * W_3 * W_4 * W_6;$$

$$i = 2; H_{12}(S) = -W_3 * W_5;$$

3) Пар и троек несовпадающих контуров нет;

$$\Phi(S) = 1 + W_1 * W_3 * W_4 * W_6 + W_3 * W_5;$$

$$\Phi_1(S) = 1 + W_3 * W_5;$$

$$W(S) = \frac{W_1 * W_2 * W_6 * (1 + W_3 * W_5)}{1 + W_1 * W_3 * W_4 * W_6 + W_3 * W_5} =$$

$$= \frac{W_1 * W_2 * W_6 + W_1 * W_2 * W_3 * W_5 * W_6}{1 + W_1 * W_3 * W_4 * W_6 + W_3 * W_5} =$$

$$= \frac{\frac{k_1 * k_2 * k_6}{(T_2 * S + 1) * (T_6 * S + 1)} + \frac{k_1 * k_2 * k_3 * k_5 * k_6}{(T_2 * S + 1) * (T_3 * S + 1) * (T_6 * S + 1)}}{1 + \frac{k_1 * k_3 * k_4 * k_6}{(T_3 * S + 1) * (T_6 * S + 1) * S} + \frac{k_3 * k_5}{T_3 * S + 1}} =$$

Инв. № подл.	Подп. и дата.	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата.	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	

$$= \frac{k_1 * k_2 * k_6 * T_3 * S^2 + (k_3 * k_5 + 1) * k_1 * k_2 * k_6 * S}{T_2 * T_3 * T_6 * S^4 + (T_2 * T_3 + T_2 * T_6 + k_3 * k_5 * T_2 * T_6 + T_3 * T_6) * S^3 +$$

$$+ (k_3 * k_5 * T_2 + k_3 * k_5 * T_6 + T_2 + T_3 + T_6) * S^2 +$$

$$+ (k_1 * k_3 * k_4 * k_6 * T_2 + k_3 * k_5) * S + k_1 * k_3 * k_4 * k_6$$

$$W(S) = \frac{13.67 * S^2 + 143.16 * S}{0.26 * S^4 + 3.4 * S^3 + 7.13 * S^2 + 5.22 * S + 2.58}$$

Полученная ОСПФ полностью совпадает с ОСПФ, полученной путем структурного преобразования исходной расчетной схемы

2.3 Расчет ПФ на компьютере

Построим БСС в программе “CLASSIC” и найдем ее ПФ:

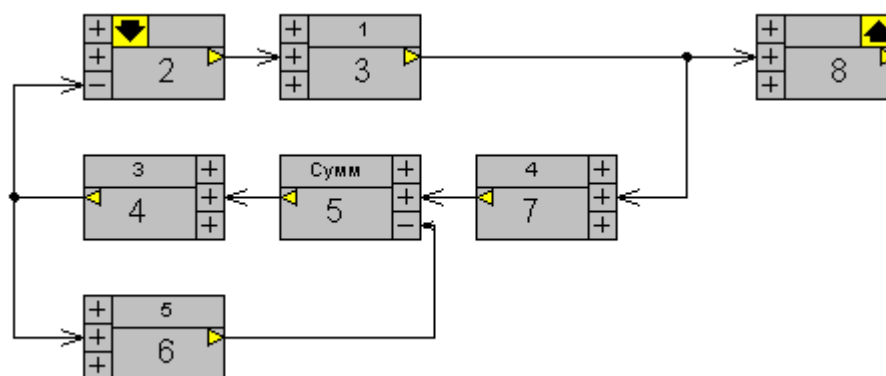


Рисунок 2.6. исходная расчетная БСС в программе “CLASSIC”.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Инв. № подл.
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Лист
					10

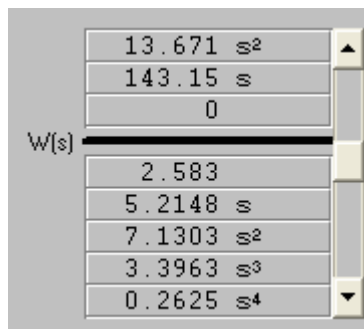


Рисунок 2.7. ПФ расчетной СС в программе “CLASSIC”.

ПФ, полученная в программе “CLASSIC” полностью совпадает с ПФ, полученными ранее.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата							Лист
											11
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата							
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата							

3. Расчет нулей и полюсов

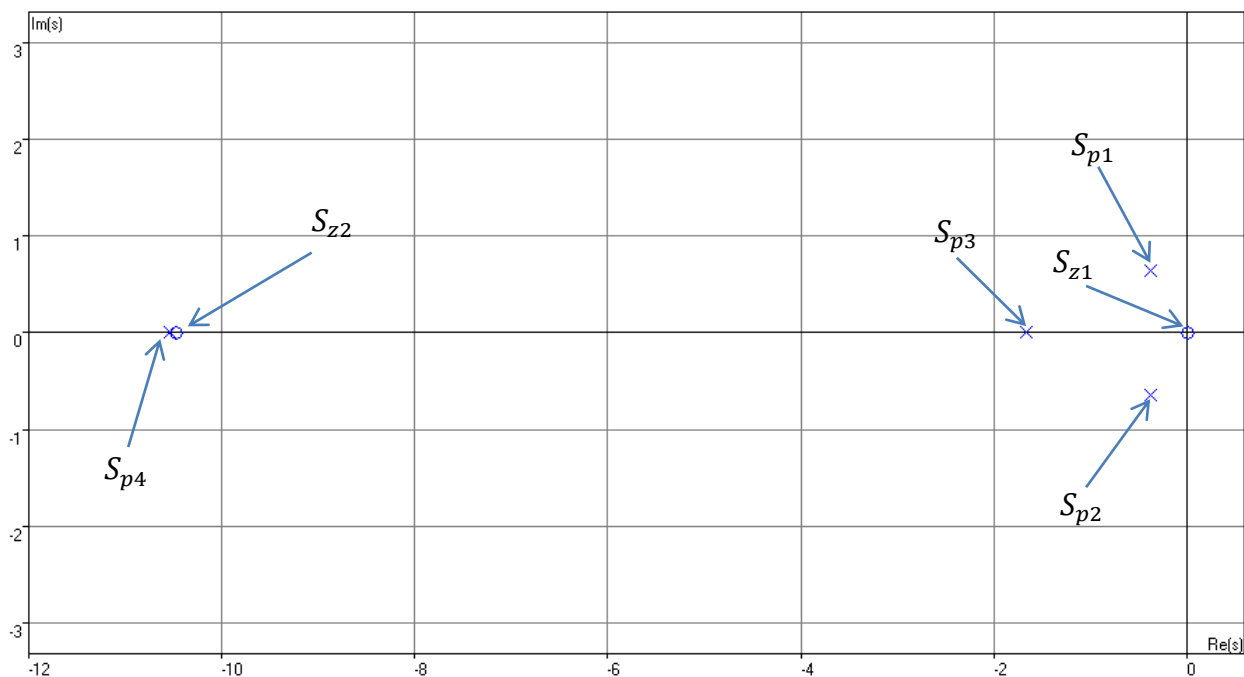


Рисунок 3.1. Нули и полюсы, полученные в программе “CLASSIC”.

Ноль #1:

$$S_{z1} = 0; n_1 = 1;$$

Ноль #2:

$$S_{z2} = -10,47; n_2 = 1;$$

Полюс #1:

$$S_{p1} = -0.37 + j * 0.65; n_1 = 1;$$

Полюс #2:

$$S_{p2} = -0.37 - j * 0.65; n_2 = 1;$$

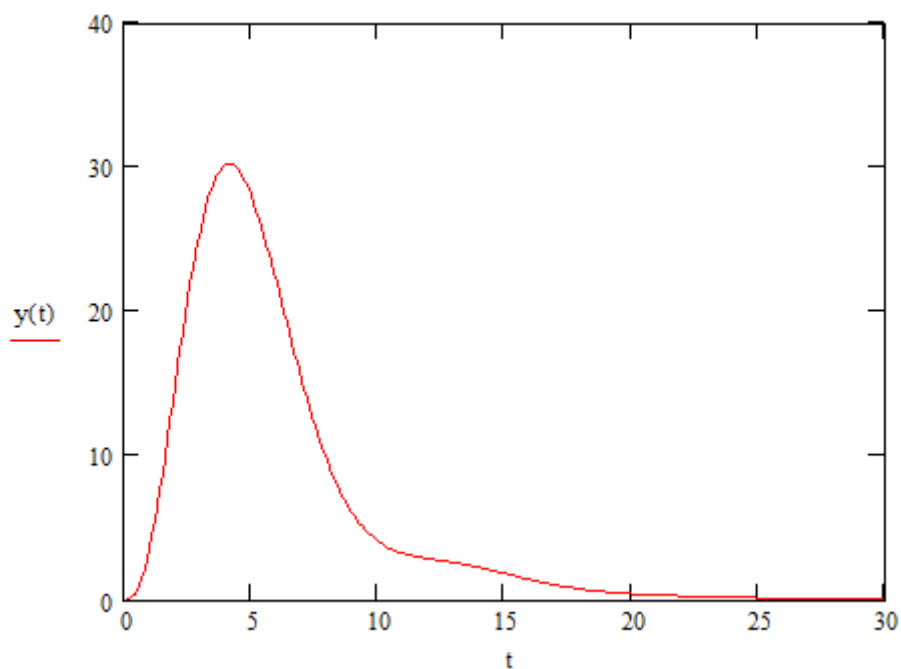
Полюс #3:

$$S_{p3} = -1.67; n_3 = 1;$$

Полюс #4:

Инв. № подл.	Подп. и дата.
Взам. Инв. №	Инв. № дубл.
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата
-----	------	---------	---------	------



4.2 Расчет ПП графическим способом (по методу Солодовникова)

Так как система является устойчивой, то рассчитаем переходный процесс по методу Солодовникова.

ПФ имеет вид:

$$W(S) := \frac{(43.74S^2 + 458.11S)}{1.04S^5 + 13.86S^4 + 31.92S^3 + 28.01S^2 + 15.54S + 2.58}$$

Выпишем коэффициенты и найдем ВЧПФ:

$$g0 := 43.74 \quad g1 := 458.11$$

$$d0 := 1.04 \quad d1 := 13.86 \quad d2 := 31.92 \quad d3 := 28.01 \quad d4 := 15.54 \quad d5 := 2.58$$

$$\text{ReG}(w) := -g0 \cdot w^2$$

$$\text{ImG}(w) := g1 \cdot w$$

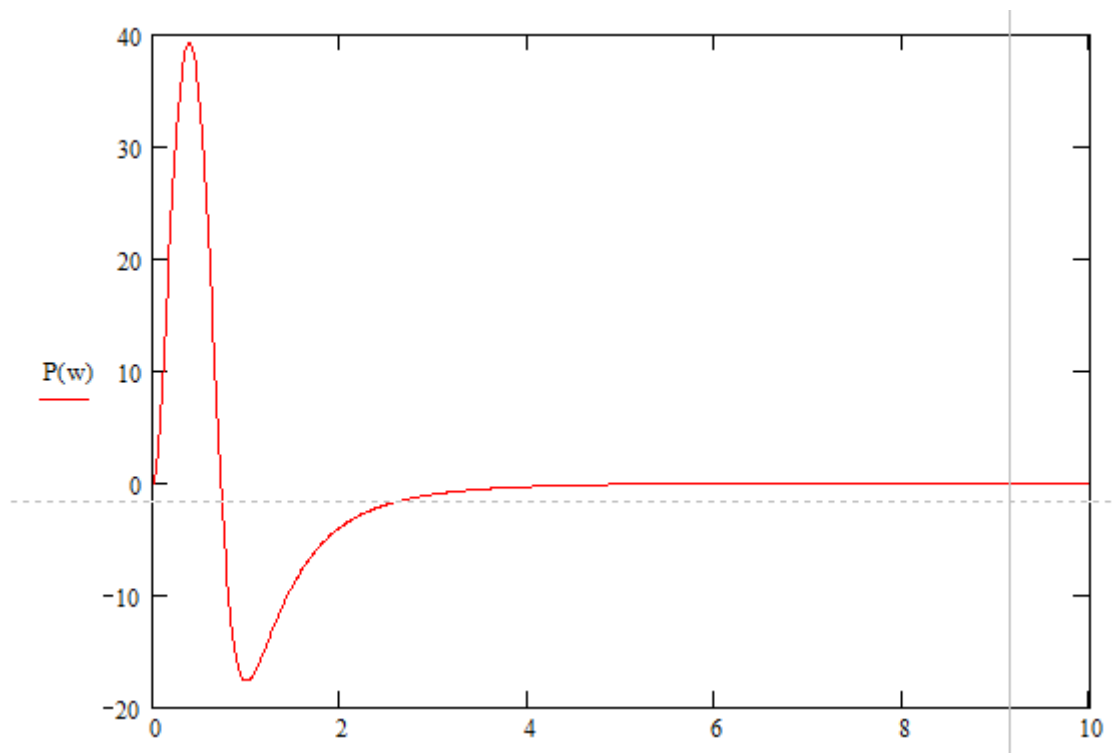
$$\text{ReH}(w) := d1 \cdot w^4 - d3 \cdot w^2 + d5$$

$$\text{ImH}(w) := d0 \cdot w^5 - d2 \cdot w^3 + d4 \cdot w$$

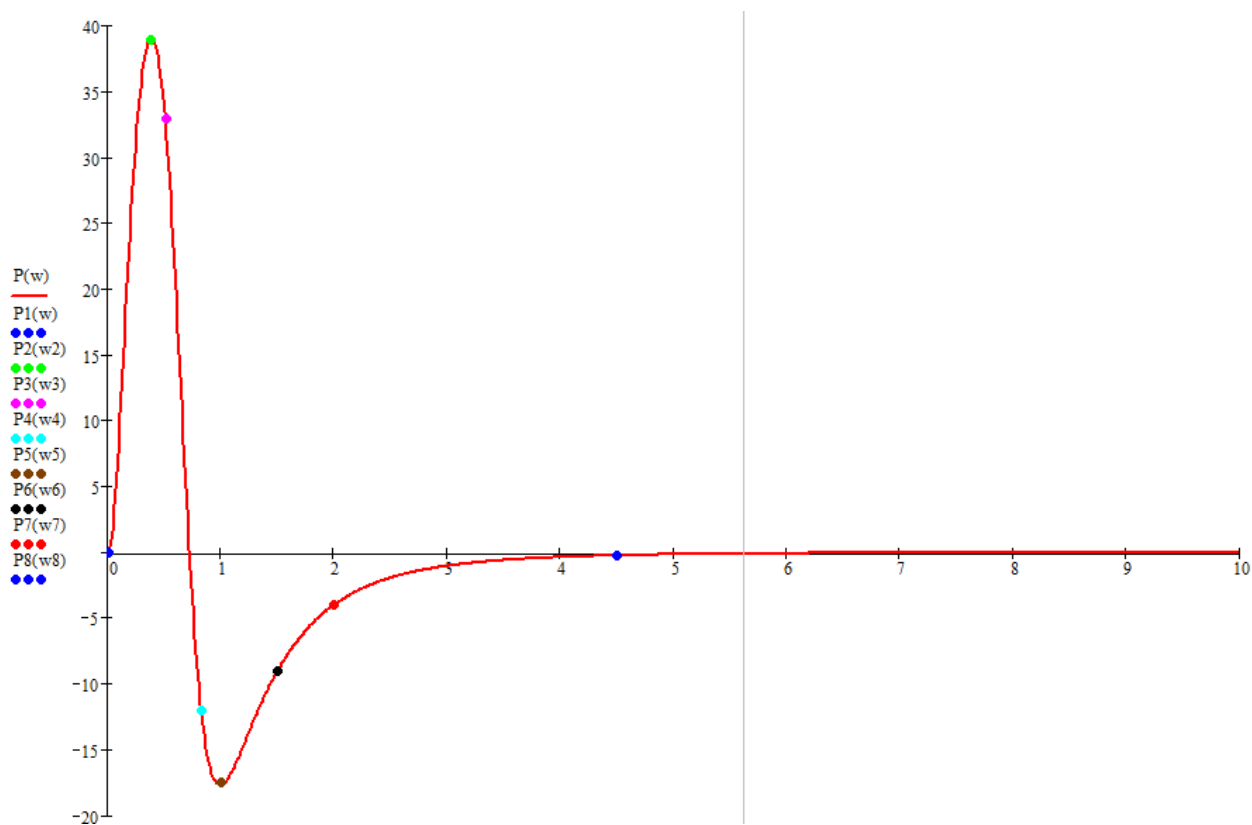
$$P(w) := \frac{(\text{ReG}(w) \cdot \text{ReH}(w) + \text{ImG}(w) \cdot \text{ImH}(w))}{\text{ReH}(w)^2 + \text{ImH}(w)^2}$$

$$w := 0, 0.01 \dots 10$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата						Лист
										15
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата						



Аппроксимируем полученный график выбранными отрезками:



Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. Инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	

Далее строим в Excel таблицу для вычисления высоты и коэффициента наклона:

P1(ω)	P2(ω)	P3(ω)	P4(ω)	P5(ω)	P6(ω)	P7(ω)	P8(ω)	P9(ω)
0	39	33	-12	-17,5	-9	-3,95	-0,2	0
ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8	ω_9
0	0,384	0,51	0,83	1	1,5	2	4,5	7
P_k	P_k	P_k	P_k	P_k	P_k	P_k	P_k	P_k
-39	6	45	5,5	-8,5	-5,05	-3,75	-0,2	
χ_k	χ_k	χ_k	χ_k	χ_k	χ_k	χ_k	χ_k	χ_k
0	0,752941	0,614458	0,83	0,666667	0,75	0,444444	0,642857	

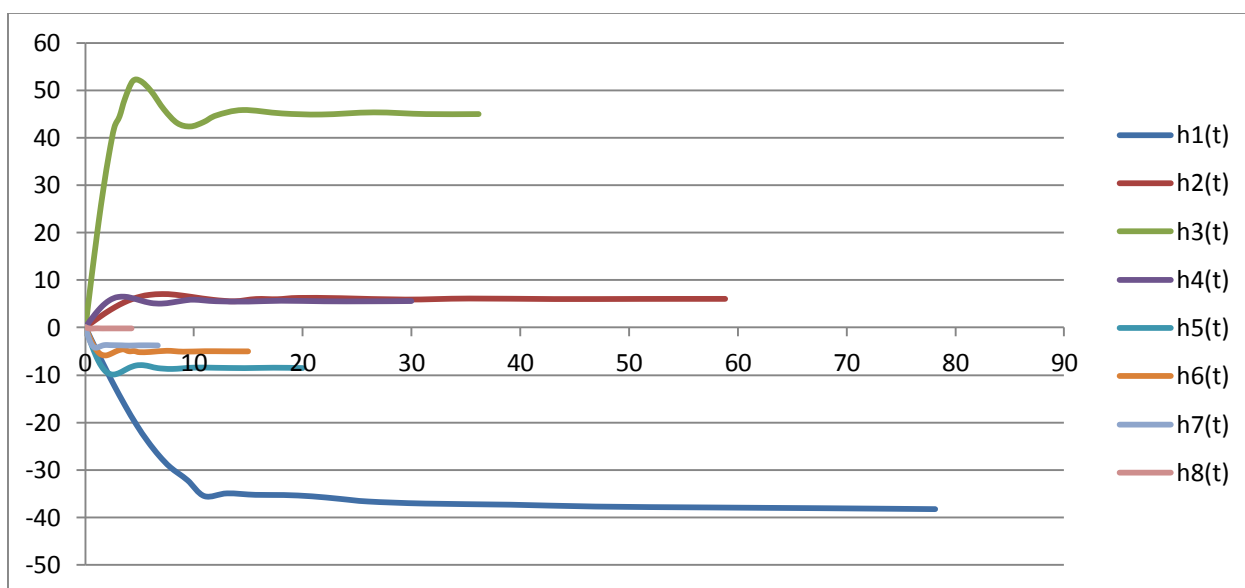
Далее из таблиц выбираем нужные стандартные функции $h_x(\tau)$ и записываем в таблицу, а затем каждую стандартную функцию пересчитываем на реальную

Высота	-39			6			45			5,5		
Коэффициент наклона χ	0			0,752941176			0,614457831			0,83		
τ	$h_x(\tau)$	t	$h_k(t)$	$h_x(\tau)$	t	$h_k(t)$	$h_x(\tau)$	t	$h_k(t)$	$h_x(\tau)$	t	$h_k(t)$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0,064	0,520833	-2,496	0,111	0,392157	0,666	0,102	0,240964	4,59	0,118	0,2	0,649
0,4	0,127	1,041667	-4,953	0,222	0,784314	1,332	0,203	0,481928	9,135	0,241	0,4	1,3255
0,6	0,189	1,5625	-7,371	0,329	1,176471	1,974	0,302	0,722892	13,59	0,347	0,6	1,9085
0,8	0,25	2,083333	-9,75	0,433	1,568627	2,598	0,396	0,963855	17,82	0,457	0,8	2,5135
1	0,31	2,604167	-12,09	0,534	1,960784	3,204	0,491	1,204819	22,095	0,561	1	3,0855
1,4	0,422	3,645833	-16,458	0,716	2,745098	4,296	0,662	1,686747	29,79	0,751	1,4	4,1305
1,8	0,525	4,6875	-20,475	0,872	3,529412	5,232	0,812	2,168675	36,54	0,908	1,8	4,994
2,2	0,615	5,729167	-23,985	0,996	4,313725	5,976	0,936	2,650602	42,12	1,031	2,2	5,6705
2,6	0,692	6,770833	-26,988	1,086	5,098039	6,516	0,988	3,13253	44,46	1,115	2,6	6,1325
3	0,755	7,8125	-29,445	1,143	5,882353	6,858	1,069	3,614458	48,105	1,162	3	6,391
3,6	0,824	9,375	-32,136	1,172	7,058824	7,032	1,153	4,337349	51,885	1,173	3,6	6,4515
4,2	0,91	10,9375	-35,49	1,148	8,235294	6,888	1,154	5,060241	51,93	1,131	4,2	6,2205
5	0,895	13,02083	-34,905	1,069	9,803922	6,414	1,107	6,024096	49,815	1,037	5	5,7035
6	0,903	15,625	-35,217	0,966	11,76471	5,796	1,02	7,228916	45,9	0,934	6	5,137
7	0,904	18,22917	-35,256	0,917	13,72549	5,502	0,957	8,433735	43,065	0,909	7	4,9995
8	0,911	20,83333	-35,529	0,996	15,68627	5,976	0,941	9,638554	42,345	0,955	8	5,2525
9	0,925	23,4375	-36,075	0,99	17,64706	5,94	0,961	10,84337	43,245	1,023	9	5,6265
10	0,939	26,04167	-36,621	1,036	19,60784	6,216	0,993	12,04819	44,685	1,059	10	5,8245
12	0,95	31,25	-37,05	1,025	23,52941	6,15	1,018	14,45783	45,81	1	12	5,5
15	0,956	39,0625	-37,284	0,977	29,41176	5,862	1,002	18,07229	45,09	0,987	15	5,4285
18	0,966	46,875	-37,674	1,014	35,29412	6,084	0,997	21,68675	44,865	1,019	18	5,6045
22	0,971	57,29167	-37,869	0,995	43,13725	5,97	1,007	26,50602	45,315	0,997	22	5,4835
26	0,975	67,70833	-38,025	1	50,98039	6	0,999	31,3253	44,955	0,996	26	5,478
30	0,98	78,125	-38,22	1,002	58,82353	6,012	0,999	36,14458	44,955	1,006	30	5,533

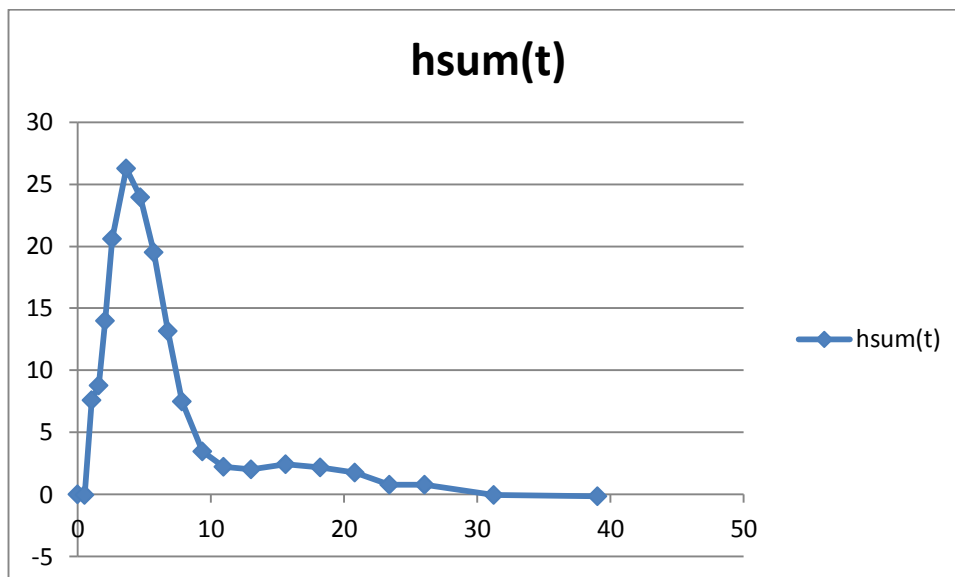
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Инв. № подл.

Высота	-8,5			-5,05			-3,75			-0,2		
Коэффициент наклона χ	0,66666667			0,75			0,44444444			0,642857143		
τ	$h\chi(\tau)$	t	$hk(t)$	$h\chi(\tau)$	t	$hk(t)$	$h\chi(\tau)$	t	$hk(t)$	$h\chi(\tau)$	t	$hk(t)$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0,105	0,133333	-0,8925	0,111	0,1	-0,56055	0,092	0,044444	-0,345	0,105	0,028571	-0,021
0,4	0,208	0,266667	-1,768	0,222	0,2	-1,1211	0,183	0,088889	-0,68625	0,208	0,057143	-0,0416
0,6	0,303	0,4	-2,5755	0,329	0,3	-1,66145	0,274	0,133333	-1,0275	0,303	0,085714	-0,0606
0,8	0,41	0,533333	-3,485	0,433	0,4	-2,18665	0,361	0,177778	-1,35375	0,41	0,114286	-0,082
1	0,505	0,666667	-4,2925	0,534	0,5	-2,6967	0,447	0,222222	-1,67625	0,505	0,142857	-0,101
1,4	0,681	0,933333	-5,7885	0,716	0,7	-3,6158	0,606	0,311111	-2,2725	0,681	0,2	-0,1362
1,8	0,833	1,2	-7,0805	0,872	0,9	-4,4036	0,747	0,4	-2,80125	0,833	0,257143	-0,1666
2,2	0,957	1,466667	-8,1345	0,996	1,1	-5,0298	0,867	0,488889	-3,25125	0,957	0,314286	-0,1914
2,6	1,052	1,733333	-8,942	1,086	1,3	-5,4843	0,964	0,577778	-3,615	1,052	0,371429	-0,2104
3	1,116	2	-9,486	1,143	1,5	-5,77215	1,038	0,666667	-3,8925	1,116	0,428571	-0,2232
3,6	1,161	2,4	-9,8685	1,172	1,8	-5,9186	1,106	0,8	-4,1475	1,161	0,514286	-0,2322
4,2	1,155	2,8	-9,8175	1,148	2,1	-5,7974	1,132	0,933333	-4,245	1,155	0,6	-0,231
5	1,097	3,333333	-9,3245	1,069	2,5	-5,39845	1,112	1,111111	-4,17	1,097	0,714286	-0,2194
6	1,001	4	-8,5085	0,966	3	-4,8783	1,062	1,333333	-3,9825	1,001	0,857143	-0,2002
7	0,941	4,666667	-7,9985	0,917	3,5	-4,63085	1,009	1,555556	-3,78375	0,941	1	-0,1882
8	0,934	5,333333	-7,939	0,996	4	-5,0298	0,982	1,777778	-3,6825	0,934	1,142857	-0,1868
9	0,967	6	-8,2195	0,99	4,5	-4,9995	0,978	2	-3,6675	0,967	1,285714	-0,1934
10	1,006	6,666667	-8,551	1,036	5	-5,2318	0,985	2,222222	-3,69375	1,006	1,428571	-0,2012
12	1,026	8	-8,721	1,025	6	-5,17625	0,99	2,666667	-3,7125	1,026	1,714286	-0,2052
15	0,993	10	-8,4405	0,977	7,5	-4,93385	0,998	3,333333	-3,7425	0,993	2,142857	-0,1986
18	0,997	12	-8,4745	1,014	9	-5,1207	1,01	4	-3,7875	0,997	2,571429	-0,1994
22	1,005	14,66667	-8,5425	0,995	11	-5,02475	0,998	4,888889	-3,7425	1,005	3,142857	-0,201
26	0,995	17,33333	-8,4575	1	13	-5,05	0,996	5,777778	-3,735	0,995	3,714286	-0,199
30	1,004	20	-8,534	1,002	15	-5,0601	1,003	6,666667	-3,76125	1,004	4,285714	-0,2008

Теперь построим графики каждой $h(t)$:



Остается суммировать графики и получить переходную функцию:



Вывод: Полученный график переходной функции отличается, от полученного в Mathcad из-за низкой точности аппроксимации графика ВЧПФ.

4.3 Расчет ПП машинным способом

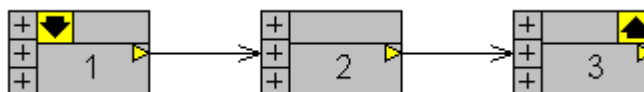


Рисунок 4.1. БСС в программе “CLASSIC”.

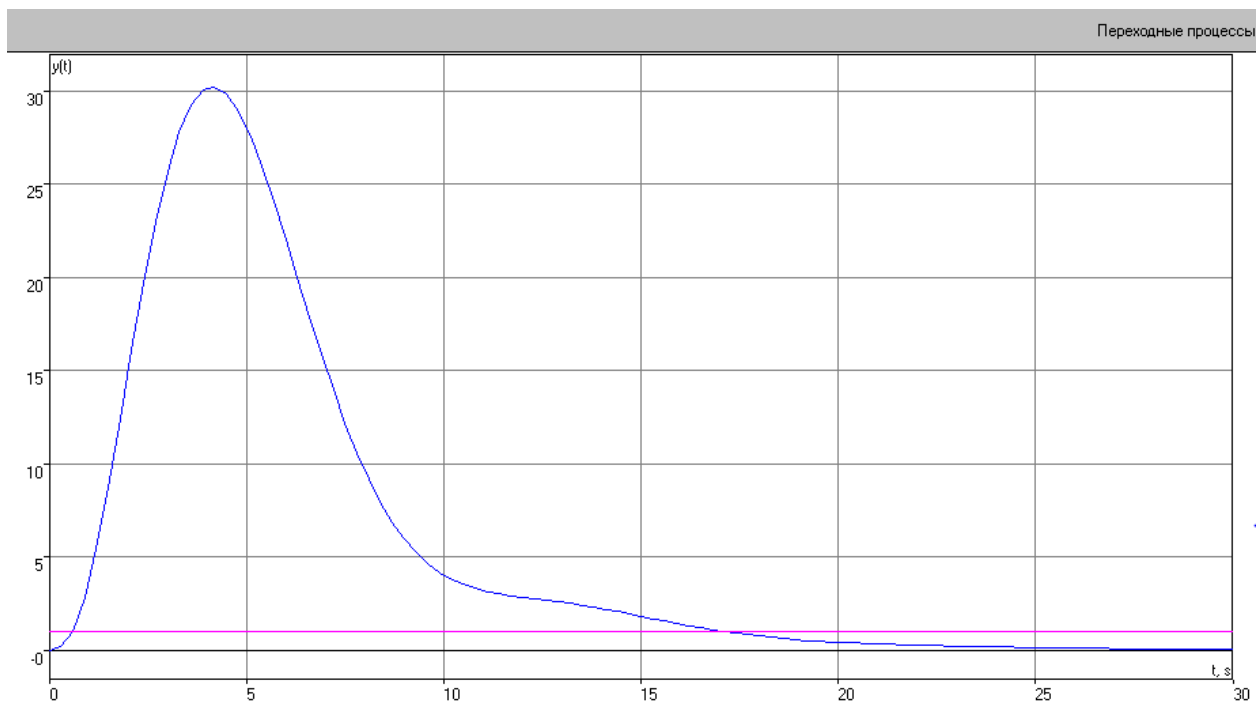
Блок “1” – формирующий блок с ПФ:

$$W_1(S) = g(S) = \frac{3.2}{4 * S + 1}$$

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. Ине. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	
Ине. № подл.	

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата
-----	------	---------	---------	------

Полученный график $h(t)$:



График, полученный машинным способом совпадает с полученными ранее графиками.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	

Лист
20

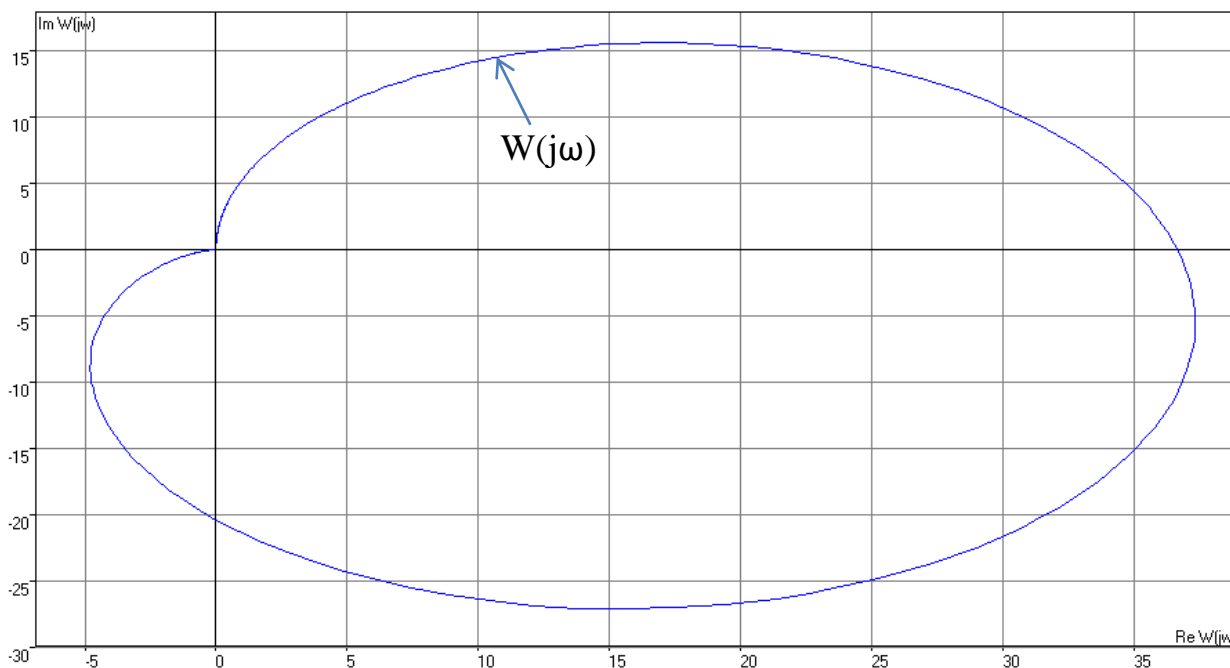
5. Частотный анализ

5.1 Годограф частотной передаточной функции (ЧПФ) САУ

$$W(S) = \frac{13.67 * S^2 + 143.16 * S}{0.26 * S^4 + 3.4 * S^3 + 7.13 * S^2 + 5.22 * S + 2.58};$$

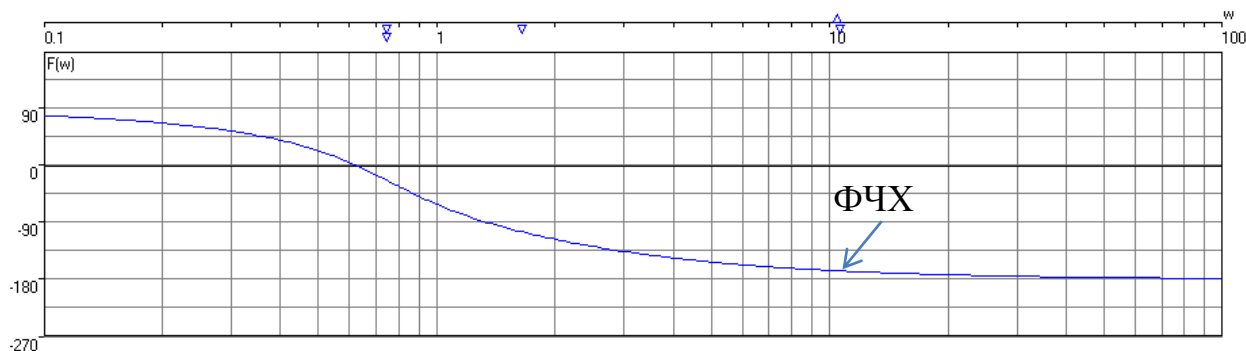
$$S = j\omega;$$

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{13.67 * (j\omega)^2 + 143.16 * (j\omega)}{0.26 * (j\omega)^4 + 3.4 * (j\omega)^3 + 7.13 * (j\omega)^2 + 5.22 * (j\omega) + 2.58} = \\ &= \frac{-13.67 * \omega^2 + 143.16 * j\omega}{0.26 * \omega^4 - 3.4 * (j\omega)^3 - 7.13 * \omega^2 + 5.22 * j\omega + 2.58} = \\ &= \frac{-13.67 * \omega^2 + j * 143.16 * \omega}{(0.26 * \omega^4 - 7.13 * \omega^2 + 2.58) + j * (5.22 * \omega - 3.4 * \omega^3)} \end{aligned}$$



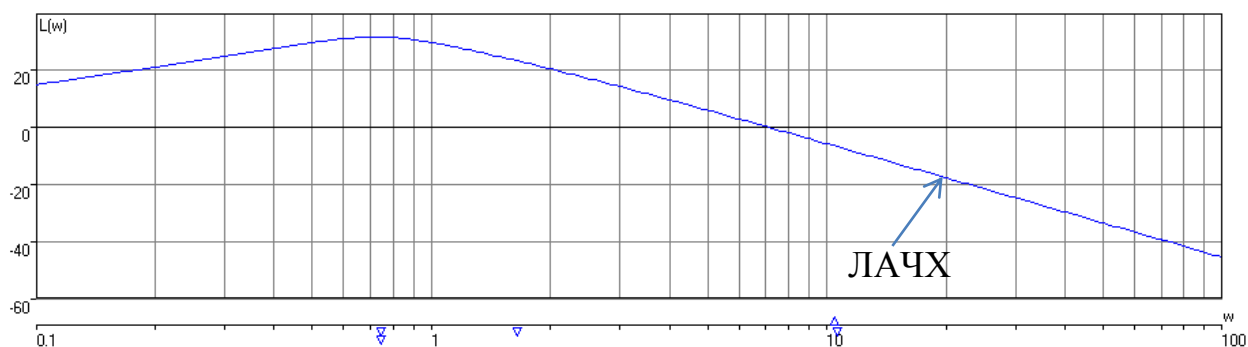
5.2 Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) САУ

$$\psi(\omega) = \arctg \left(\frac{Im(\omega)}{Re(\omega)} \right)$$



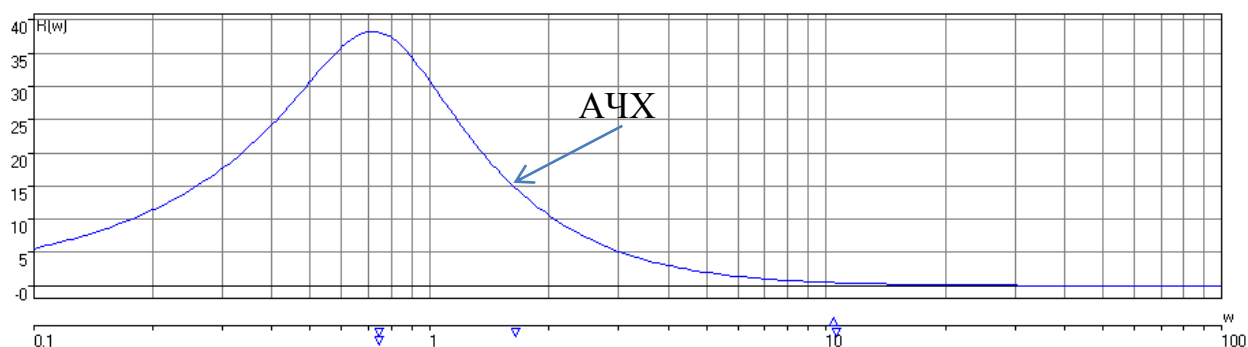
Инв. № подл.	Подп. и дата.
Взам. Инв. №	Инв. № дубл.
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

5.3 Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) САУ



5.4 Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) САУ

$$A(\omega) = \sqrt{Re^2(\omega) + Im^2(\omega)}$$



5.5 Вещественная частотная передаточная функция (ВЧПФ) САУ

$$j := \sqrt{-1}$$

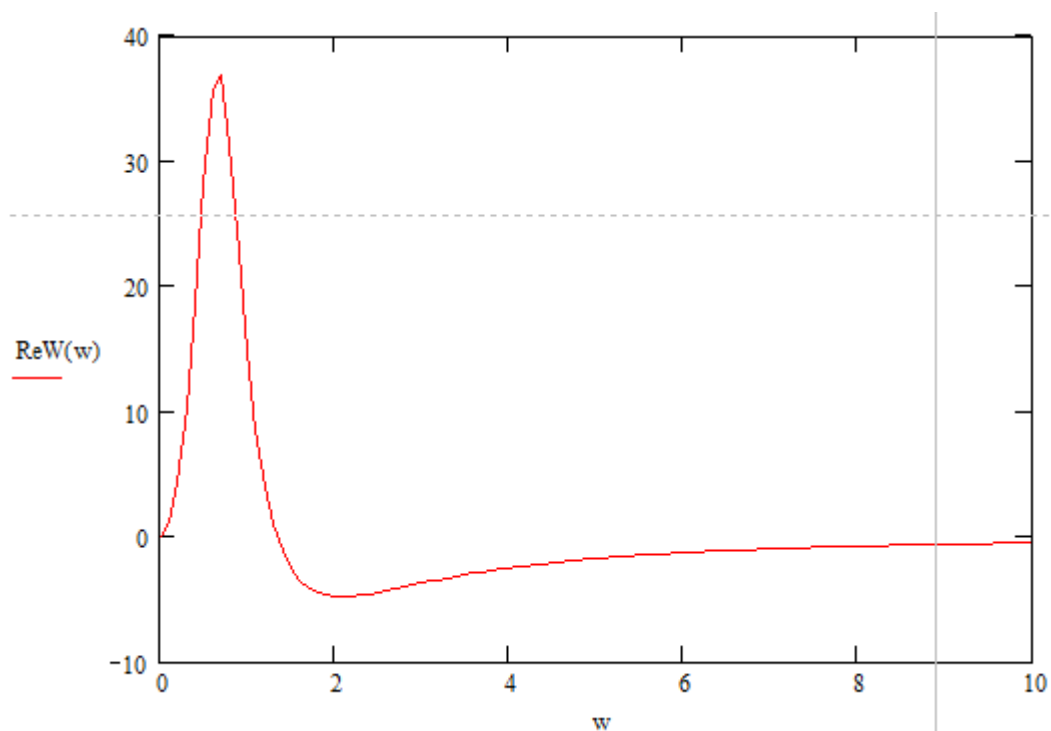
$$W(\omega) := \frac{(-13.67\omega^2 + j \cdot 143.16\omega) \cdot [(0.26\omega^4 - 7.13\omega^2 + 2.58) - j \cdot (5.22\omega - 3.4\omega^3)]}{[(0.26\omega^4 - 7.13\omega^2 + 2.58) + j \cdot (5.22\omega - 3.4\omega^3)] \cdot [(0.26\omega^4 - 7.13\omega^2 + 2.58) - j \cdot (5.22\omega - 3.4\omega^3)]}$$

$$ReW(\omega) := \frac{-13.67\omega^2 \cdot (0.26\omega^4 - 7.13\omega^2 + 2.58) + 143.16\omega \cdot (5.22\omega - 3.4\omega^3)}{[(0.26\omega^4 - 7.13\omega^2 + 2.58)^2 + (5.22\omega - 3.4\omega^3)^2]}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата.
Взам. Инв. №	Инв. № дубл.

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Лист
					22

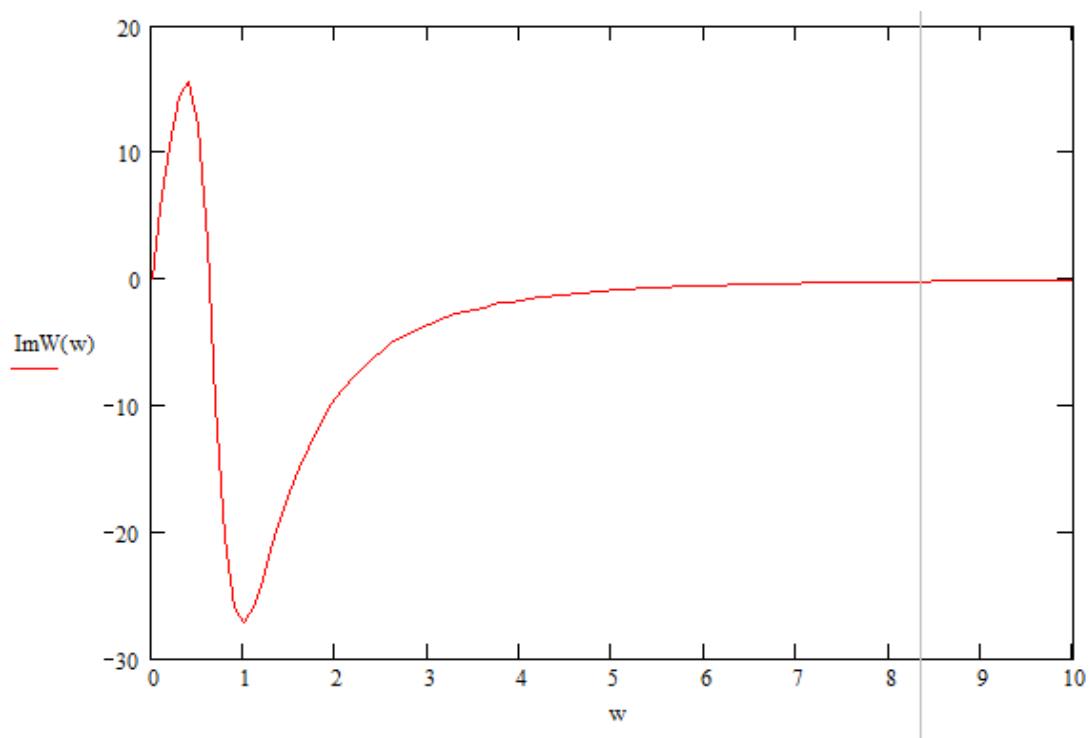
w := 0,0.1..20



5.6 Мнимая частотная передаточная функция (МЧПФ) САУ

$$\text{Im}W(w) := \frac{143.16w \cdot (0.26w^4 - 7.13w^2 + 2.58) + 13.67w^2 \cdot (5.22w - 3.4w^3)}{\left[(0.26w^4 - 7.13w^2 + 2.58)^2 + (5.22w - 3.4w^3)^2 \right]}$$

w := 0,0.1..10



Инв. № подл.	Подп. и дата
	Инв. № дубл.
	Взам. Инв. №
	Подп. и дата
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
------	------	---------	---------	------

6. Оценка устойчивости САУ

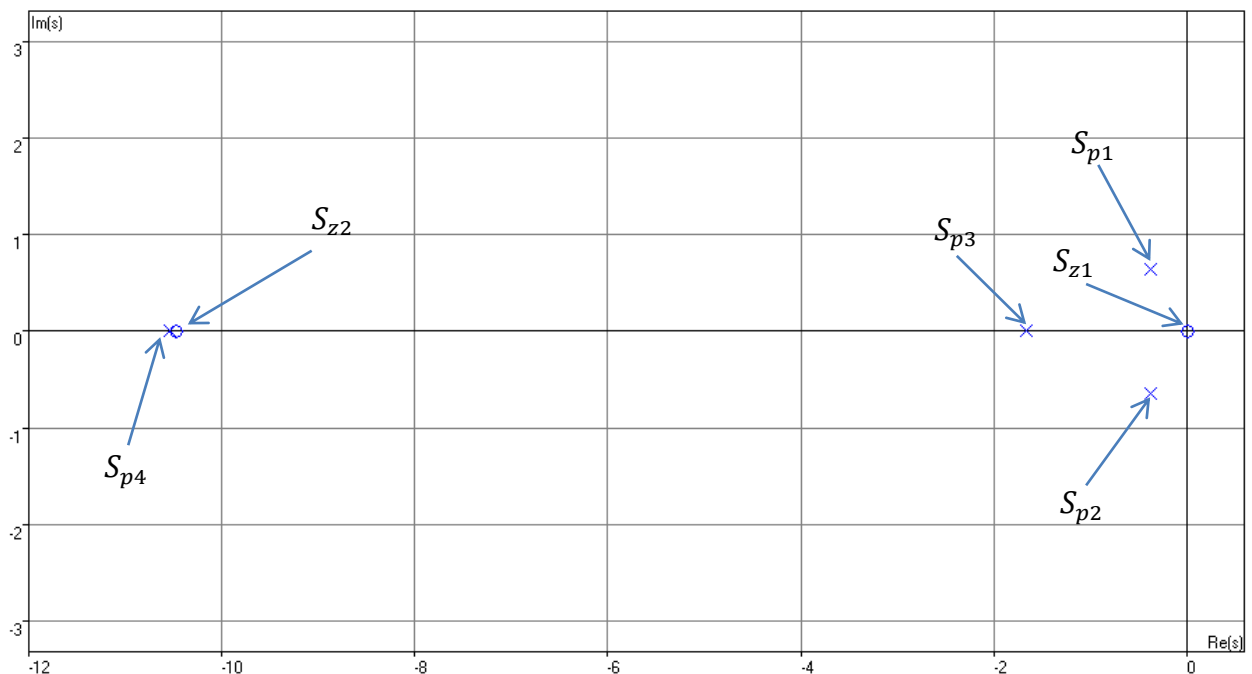
6.1 Оценка устойчивости САУ по корням характеристического полинома ПФ

ПФ системы:

$$W(S) = \frac{13.67 * S^2 + 143.16 * S}{0.26 * S^4 + 3.4 * S^3 + 7.13 * S^2 + 5.22 * S + 2.58}$$

ХП САУ имеет вид:

$$D(S) = 0.26 * S^4 + 3.4 * S^3 + 7.13 * S^2 + 5.22 * S + 2.58$$



Вывод: Так как все корни ХП расположены в ЛПП, то можно сделать вывод о том, что система устойчива.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Лист
										24

6.2 Оценка устойчивости САУ по критерию Гурвица

ХП САУ:

$$D(S) = 0.26 * S^4 + 3.4 * S^3 + 7.13 * S^2 + 5.22 * S + 2.58$$

Коэффициенты				
d0	d1	d2	d3	d4
0,26	3,4	7,13	5,22	2,58

Далее из коэффициентов d_j формируется матрица Гурвица

Матрица Гурвица			
3,4	5,22	0	0
0,26	7,13	2,58	0
0	3,4	5,22	0
0	0,26	7,13	2,58

Рассчитаем миноры Гурвица:

Миноры Гурвица			
M1	M2	M3	M4
3,4	22,8848	89,63386	231,2553

Вывод: Так как все миноры Гурвица положительны и $d_0 > 0$, можно сделать вывод о том, что система устойчива.

6.3 Оценка устойчивости САУ по методу Рауса

ХП САУ:

$$D(S) = 0.26 * S^4 + 3.4 * S^3 + 7.13 * S^2 + 5.22 * S + 2.58$$

Коэффициенты				
d0	d1	d2	d3	d4
0,26	3,4	7,13	5,22	2,58

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата					
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата					
					Лист				
					25				

Система является устойчивой, если в результате проверки по критерию Рауса все элементы первого столбца таблицы Рауса будут положительны.

Для проверки САУ построим таблицу Рауса:

Таблица Рауса		
0,26	7,13	2,58
3,4	5,22	0
6,730824	2,58	0
3,916742	0	0
2,58	0	0

Вывод: Все элементы первого столбца положительны, следовательно САУ устойчива.

6.4 Оценка устойчивости САУ по Михайлову

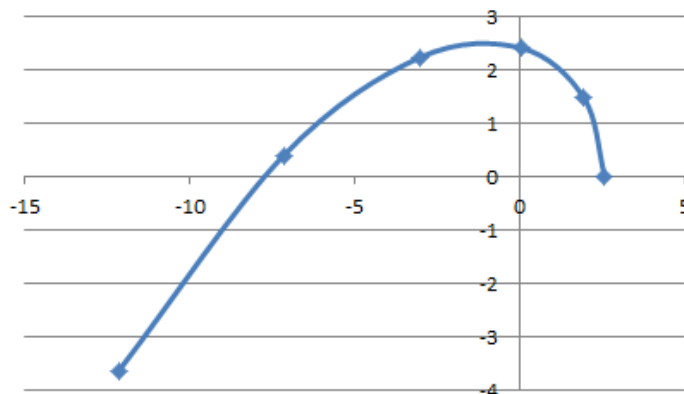
ХП САУ:

$$D(S) = 0.26 * S^4 + 3.4 * S^3 + 7.13 * S^2 + 5.22 * S + 2.58$$

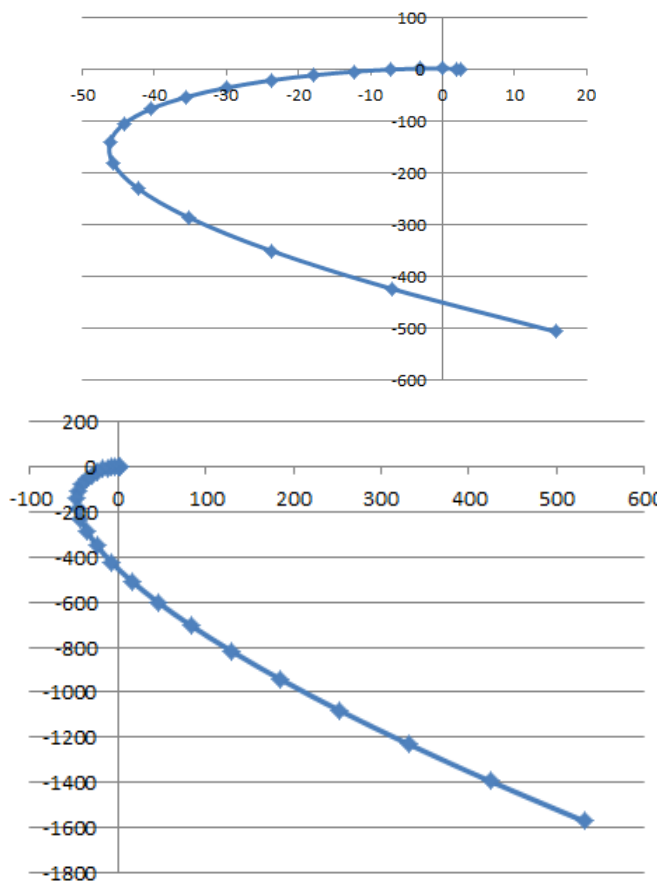
Коэффициенты				
d0	d1	d2	d3	d4
0,26	3,4	7,13	5,22	2,58

Для того, чтобы система была устойчивой годограф Михайлова, начинаясь на вещественной оси в точке $d_n > 0$, должен повернуться против часовой стрелки на угол $n * \frac{\pi}{2}$, последовательно пересекая координатные оси каждый раз против часовой стрелки и не проходя через начало координат.

Построим годограф Михайлова:



Годограф начинается в точке $d_n = 2.58$, что соответствует предыдущему условию, и поворачивается на угол $3 * \frac{\pi}{2}$ при изменении значения частоты ω от 0 до 2,4.



При дальнейшем увеличении ω годограф не меняет своего положения и делает суммарный поворот на угол $4 * \frac{\pi}{2}$. Так как в нашем случае $n=4$, то систему можно считать устойчивой.

Инв. № подл.	Подп. и дата.
Взам. Инв. №	Инв. № дубл.
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Лист
					27

6.5 Оценка устойчивости САУ методом D-разбиения

ХП САУ:

$$D(S) = 0.26 * S^4 + 3.4 * S^3 + 7.13 * S^2 + 5.22 * S + 2.58$$

Запишем ХП САУ в параметрическом виде:

$$D(S) = T_2 * T_3 * T_6 * S^4 + (k_3 * k_5 * T_2 * T_6 + T_2 * T_3 + T_2 * T_6 + T_3 * T_6) * S^3 + (k_3 * k_5 * T_2 + k_3 * k_5 * T_6 + T_2 + T_3 + T_6) * S^2 + (k_1 * k_3 * k_4 * k_6 * T_2 + k_3 * k_5 + 1) * S + k_1 * k_3 * k_4 * k_6$$

D-разбиение будем проводить по параметру T_3 :

$$T_3 * T_2 * T_6 * S^4 + T_3 * (T_2 + T_6) * S^3 + (k_3 * k_5 * T_2 * T_6 + T_2 * T_6) * S^3 + T_3 * S^2 + (k_3 * k_5 * T_2 + k_3 * k_5 * T_6 + T_2 + T_6) * S^2 + (k_1 * k_3 * k_4 * k_6 * T_2 + k_3 * k_5 + 1) * S + k_1 * k_3 * k_4 * k_6$$

Подставим значения для всех параметров, кроме T_3 :

$$0,75 * T_3 * S^4 + 1,85 * T_3 * S^3 + 2,75 * S^3 + T_3 * S^2 + 6,78 * S^2 + 5,22 * S + 2,583$$

Сгруппируем элементы и приравняем полученный полином к 0:

$$T_3 * (0,75 * S^4 + 1,85 * S^3 + S^2) + 2,75 * S^3 + 6,78 * S^2 + 5,22 * S + 2,583 = 0$$

$$T_3 = - \frac{2,75 * S^3 + 6,78 * S^2 + 5,22 * S + 2,583}{0,75 * S^4 + 1,85 * S^3 + S^2}$$

$$S = j\omega$$

$$N = 0.75 * \omega^4 - 1.85 * j * \omega^3 - \omega^2$$

$$N_1 = 0.75 * \omega^4 - \omega^2$$

$$N_2 = -1.85 * \omega^3$$

$$M = -2.75 * j * \omega^3 - 6.78 * \omega^2 + 5.22 * j * \omega + 2.583$$

$$M_1 = 2.583 - 6.78 * \omega^2$$

$$M_2 = 5.22 * \omega - 2.75 * \omega^3$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата						Лист
										28
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата						

$$\mu = T_3 = \alpha + j * \beta$$

$$\begin{cases} \alpha * N_1 - \beta * N_2 = -M_1 \\ \alpha * N_2 + \beta * N_1 = -M_2 \end{cases}$$

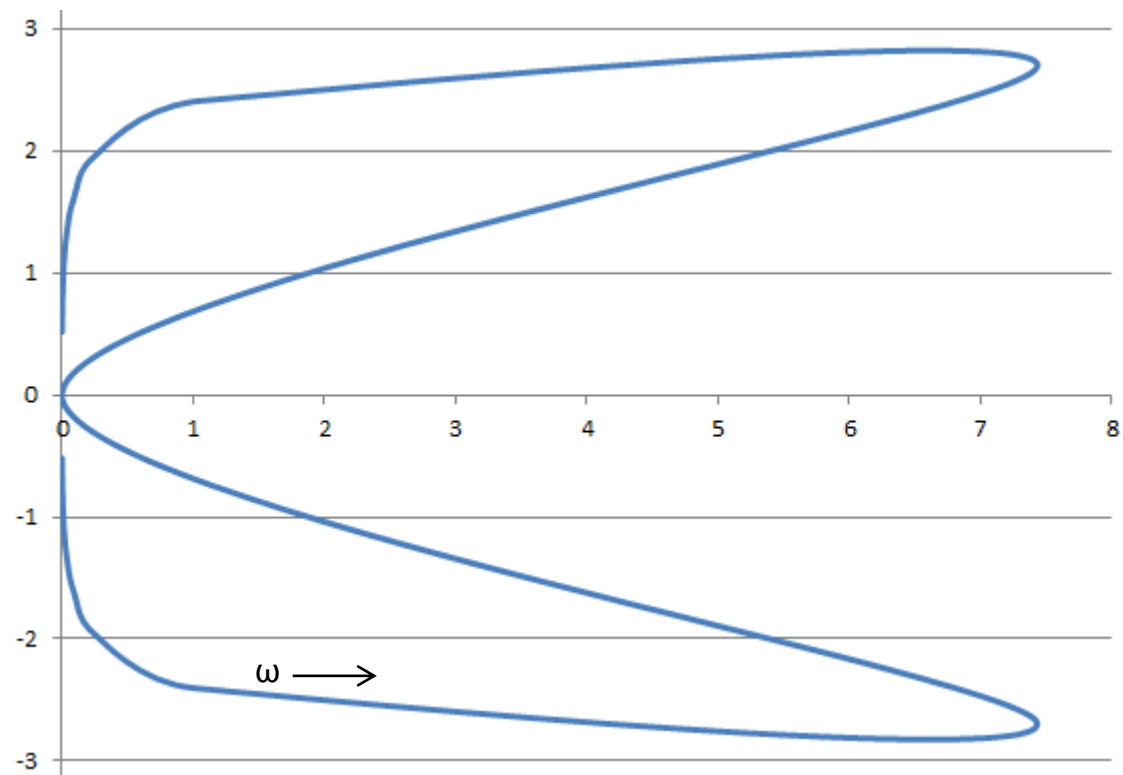
$$\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\Delta}; \beta = \frac{\Delta\beta}{\Delta}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} N_1 & -N_2 \\ N_2 & N_1 \end{vmatrix}; \Delta\alpha = \begin{vmatrix} -M_1 & -N_2 \\ -M_2 & N_1 \end{vmatrix}; \Delta\beta = \begin{vmatrix} N_1 & -M_1 \\ N_2 & -M_2 \end{vmatrix}$$

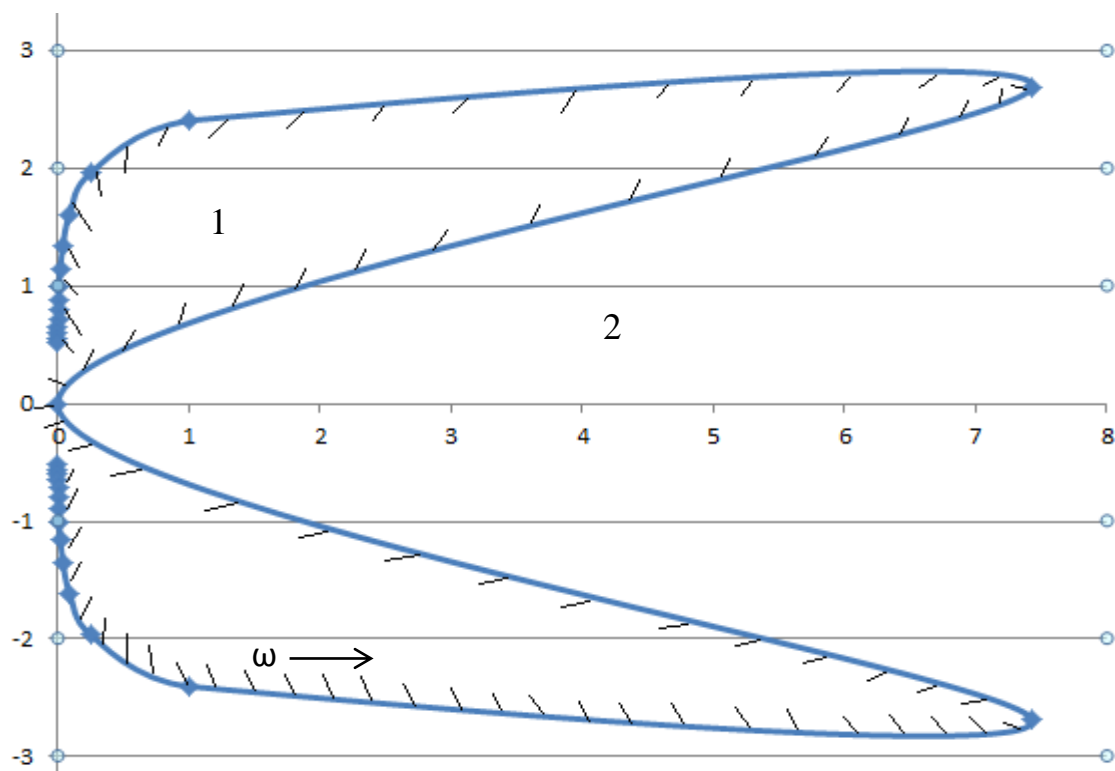
Далее произведем все расчеты в Excel и построим график:

ω	N1	N2	M1	M2	Δ	Δα	Δβ	α	β
-7	1751,75	634,55	-329,637	906,7464	3471282	2065,687	-1797564	0,000595	-0,51784
-6,5	1296,547	508,0563	-283,872	721,3226	1939155	1580,925	-1079451	0,000815	-0,55666
-6	936	399,6	-241,497	562,7112	1035776	1181,796	-623200	0,001141	-0,60167
-5,5	656,0469	307,7938	-202,512	428,8499	525134,5	860,0612	-343678	0,001638	-0,65446
-5	443,75	231,25	-166,917	317,676	250390,6	606,8438	-179568	0,002424	-0,71715
-4,5	287,2969	168,5813	-134,712	227,1272	110959,1	412,9578	-87962,8	0,003722	-0,79275
-4	176	118,4	-105,897	155,1408	44994,56	269,2013	-39843	0,005983	-0,88551
-3,5	100,2969	79,31875	-80,472	99,65445	16350,93	166,6237	-16378	0,01019	-1,00165
-3	51,75	49,95	-58,437	58,6056	5173,065	96,76503	-5951,77	0,018706	-1,15053
-2,5	23,04688	28,90625	-39,792	29,93175	1366,73	51,8666	-1840,07	0,037949	-1,34633
-2	8	14,8	-24,537	11,5704	283,04	25,05408	-455,711	0,088518	-1,61006
-1,5	1,546875	6,24375	-12,672	1,45905	41,37724	10,49206	-81,3778	0,253571	-1,96673
-1	-0,25	1,85	-4,197	-2,4648	3,485	3,51063	-8,38065	1,007354	-2,40478
-0,5	-0,20313	0,23125	0,888	-2,26365	0,094736	0,703844	-0,25445	7,429505	-2,68592
0	0	0	2,583	0	0	0	0	0	0
0,5	-0,20313	-0,23125	0,888	2,26365	0,094736	0,703844	0,254454	7,429505	2,685917
1	-0,25	-1,85	-4,197	2,4648	3,485	3,51063	8,38065	1,007354	2,404778
1,5	1,546875	-6,24375	-12,672	-1,45905	41,37724	10,49206	81,37777	0,253571	1,966728
2	8	-14,8	-24,537	-11,5704	283,04	25,05408	455,7108	0,088518	1,610058
2,5	23,04688	-28,9063	-39,792	-29,9318	1366,73	51,8666	1840,071	0,037949	1,346331
3	51,75	-49,95	-58,437	-58,6056	5173,065	96,76503	5951,768	0,018706	1,15053
3,5	100,2969	-79,3188	-80,472	-99,6545	16350,93	166,6237	16377,97	0,01019	1,001654
4	176	-118,4	-105,897	-155,141	44994,56	269,2013	39842,99	0,005983	0,885507
4,5	287,2969	-168,581	-134,712	-227,127	110959,1	412,9578	87962,84	0,003722	0,79275
5	443,75	-231,25	-166,917	-317,676	250390,6	606,8438	179568,3	0,002424	0,717153
5,5	656,0469	-307,794	-202,512	-428,85	525134,5	860,0612	343677,5	0,001638	0,654456
6	936	-399,6	-241,497	-562,711	1035776	1181,796	623199,9	0,001141	0,601674
6,5	1296,547	-508,056	-283,872	-721,323	1939155	1580,925	1079451	0,000815	0,556661
7	1751,75	-634,55	-329,637	-906,746	3471282	2065,687	1797564	0,000595	0,517839

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата



Нанесем штриховку:



Построив график и нанеся штриховку, можно сказать, что имеется две зоны, претендующие на устойчивость. Проверим правильность нанесения штриховки. Для этого возьмем $T_3 = -1$. Запишем ХП при таком значении T_3 :

$$D(S) = -0.75 * S^4 + 0.9 * S^3 + 5.78 * S^2 + 5.22 * S + 2.583$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата.

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

Проверим устойчивость по критерию Рауса:

Коэффициенты				
d0	d1	d2	d3	d4
-0,75	0,9	5,78	5,22	2,58

Таблица Рауса		
-0,75	5,78	2,58
0,9	5,22	0
10,13	2,58	0
4,99078	0	0
2,58	0	0

Так как не все элементы первого столбца положительны, можно сказать, что система при таком значении T_3 неустойчива.

Проверим устойчивость системы во второй зоне, претендующей на устойчивость. Для этого возьмем $T_3 = 1$. Запишем ХП при таком значении T_3 :

$$D(S) = 0.75 * S^4 + 4.6 * S^3 + 7.78 * S^2 + 5.22 * S + 2.583$$

Проверим устойчивость по критерию Рауса:

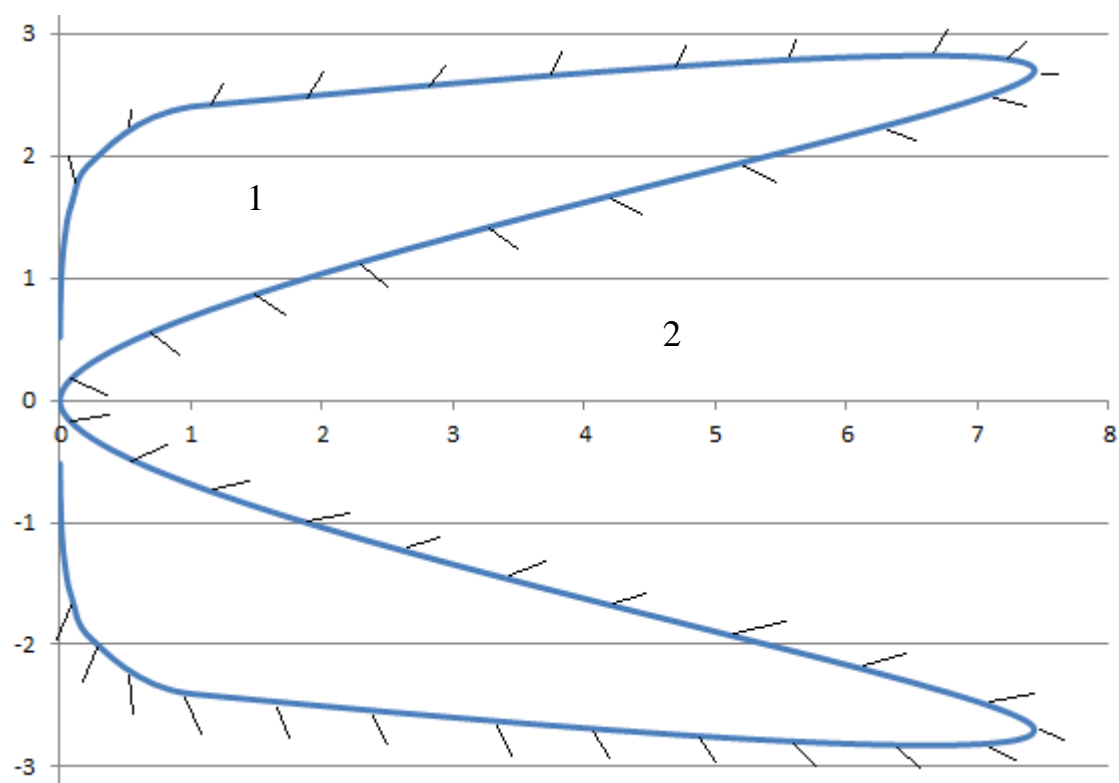
Коэффициенты				
d0	d1	d2	d3	d4
0,75	4,6	7,78	5,22	2,58

Таблица Рауса		
0,75	7,78	2,58
4,6	5,22	0
6,928913	2,58	0
3,507177	0	0
2,58	0	0

Так как все элементы первого столбца положительны можно сказать, что система устойчива при значении $T_3 = 1$, а значит штриховка нанесена неверно и нужно нанести ее заново.

Инв. № подл.	Подп. и дата.
Взам. Инв. №	Инв. № дубл.

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Лист
					31

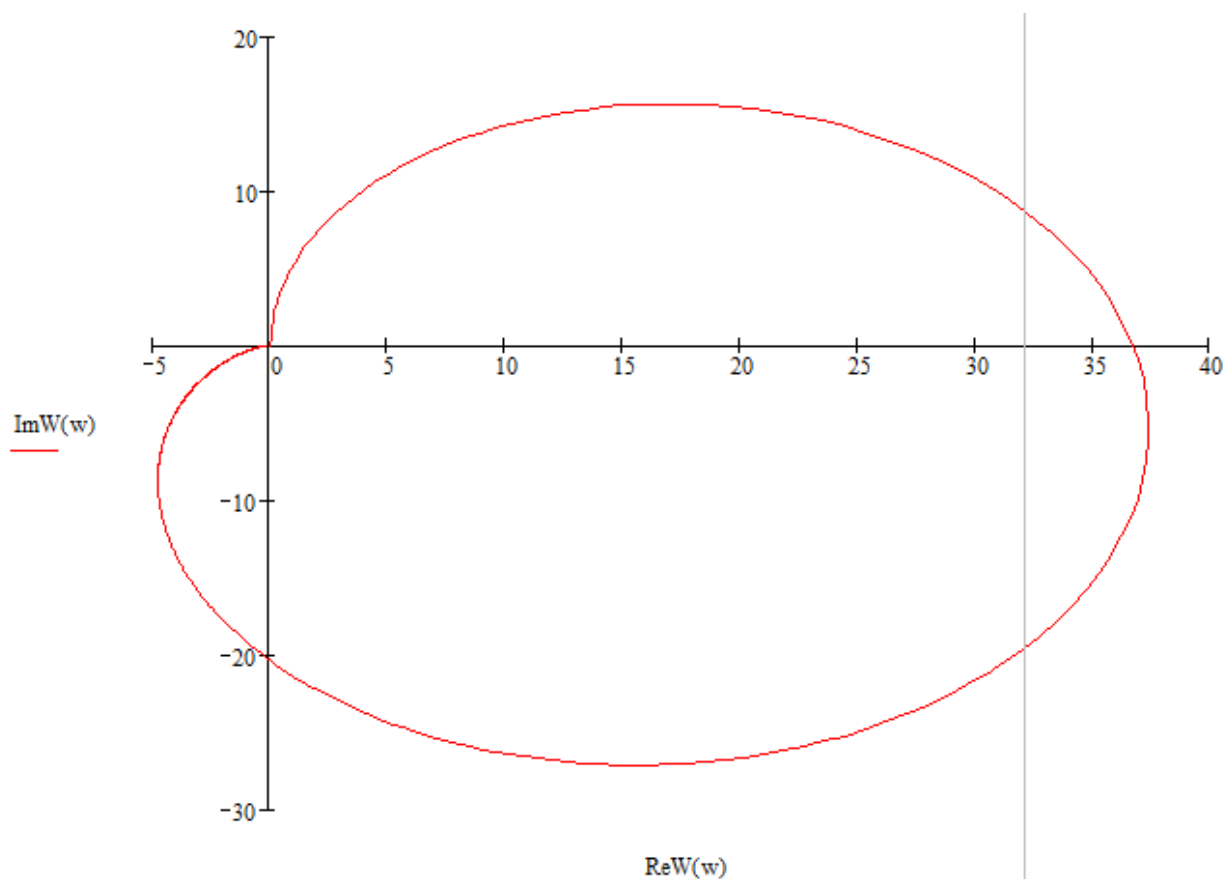


Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

Лист
32

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата.

$$W(j\omega) = \frac{-13.67 * \omega^2 + j * 143.16 * \omega}{(0.26 * \omega^4 - 7.13 * \omega^2 + 2.58) + j * (5.22 * \omega - 3.4 * \omega^3)}$$


Перейдем к расчету параметров режима автоколебаний. Запишем исходные данные и формулы, нужные для расчета:

$$b := 2 \qquad m := 0 \qquad c := 1.5$$

$$q(a) := 2 \cdot \frac{c}{\pi \cdot a} \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} + \sqrt{1 - m^2 \frac{b^2}{a^2}} \right)$$

$$q_1(a) := \frac{(2 \cdot c \cdot b)}{\pi \cdot a^2} \cdot (m - 1)$$

$$\text{Mn(a)} := \frac{q(a) - j \cdot q1(a)}{q(a)^2 + q1(a)^2}$$

Для построения годографа выделим вещественную и мнимую части нелинейного звена:

$$\text{ReMn}(a) := \frac{q(a)}{(q(a)^2 + q1(a)^2)}$$

$$\text{ImMn}(a) := \frac{q1(a)}{q(a)^2 + q1(a)^2}$$



Видно, что графики пересекаются. Для нахождения точки пересечения воспользуемся функцией root в пакете Mathcad:

$$E1(w) := \text{ImW}(w) - \text{ImMn}(w)$$

$$w1 := \text{root}(E1(w), w, 0.1, 80)$$

$$w1 = 0.637$$

Проверим правильность расчета:

$$\text{ImW}(w1) = -0.539$$

$$\text{ImMn}(w1) = -0.539$$

Значения совпадают.

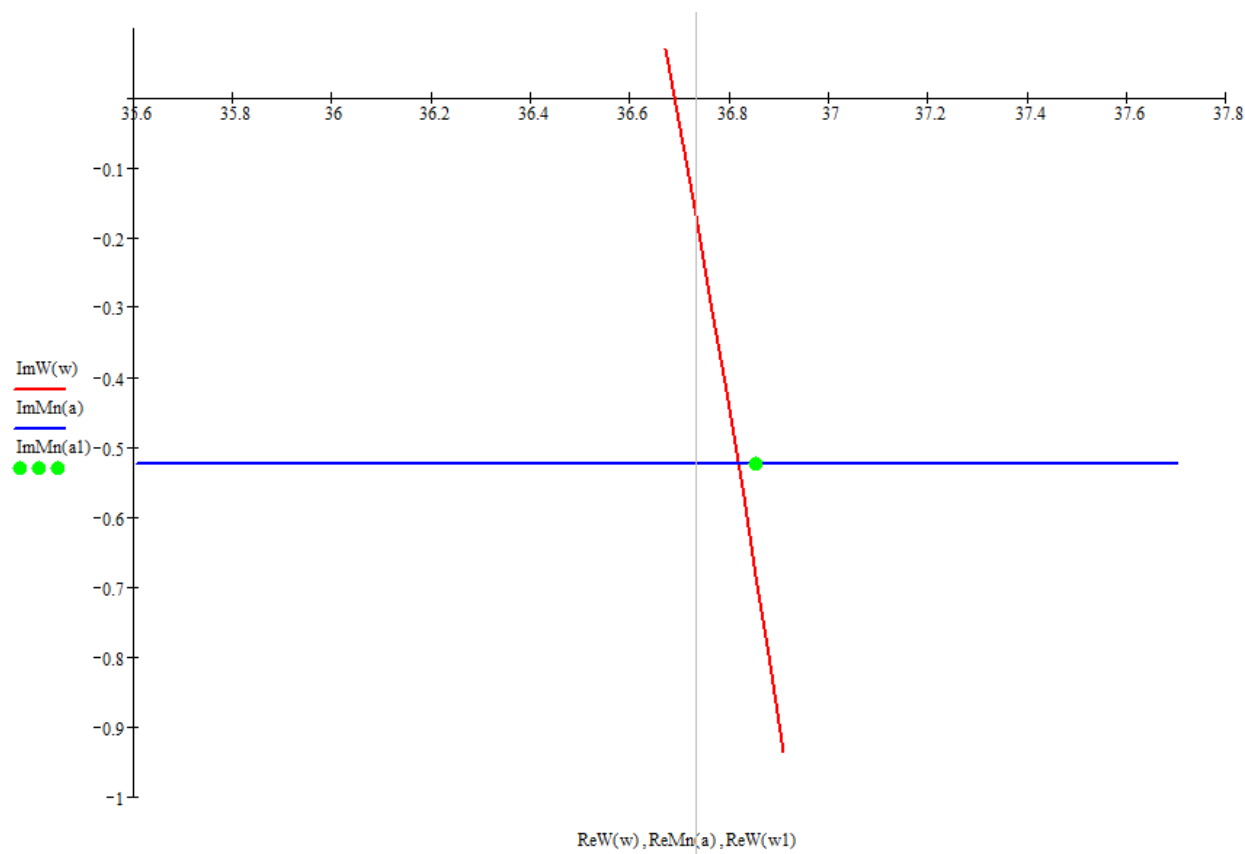
Име. № подл.	Подп. и дата.
Взам. Име. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата
-----	------	---------	---------	------

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата.

$$\text{ReMn(a1)} = 37.075$$

Выведем точку на график для проверки правильности расчета:



На графике видно, что точка пересечения найдена правильно. Расчеты показали, что автоколебания в данной САУ возникают при частоте $\omega = 0,637$ и амплитуде $a = 70.808$.

Заключение

В данном курсовом проекте исследовалась достаточно сложная САУ. Заданная САУ исследовалась по временному и частотному анализу. Был проведен расчет переходных процессов, расчет на устойчивость по критерию Гурвица, методу Рауса, по Михайлову и методом D-разбиения. Расчет САУ производился с помощью программы “CLASSIC” и математического пакета “Mathcad”. Следовательно, можно сделать вывод о том, что в процессе выполнения курсового проекта были применены все теоретические и практические знания, полученные при изучении курса ТАУ.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. Инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата						
										Лист
										36
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата						