**Вариант - 10.**

Исходные данные:

Тип системы - ФАПЧ.

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0004_17107927.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0005_17107958.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0006_17107990.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0007_17108005.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0008_17108036.JPG

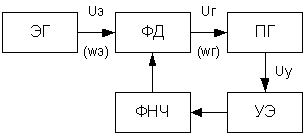
G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0009_17108068.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0010_17108099.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0011_17108130.JPG

1. Исследуем назначение, области применения и особенности построения систем автоподстройки частоты ФАПЧ. Нарисуем и поясним функциональную схему системы автоподстройки частоты. Составим дифференциальные уравнения, описывающие работу системы. Получим эквивалентную структурную схему системы автоподстройки частоты.

Системы автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) применяются в радиоприемных устройствах, перестраиваемых по частоте генераторах высокостабильных колебаний и других устройствах. Функциональная схема системы ФАПЧ имеет следующий вид:



Система стабилизирует частоту подстраиваемого генератора (ПГ) по сигналу с высокостабильного эталонного генератора (ЭГ).

Объектом управления в системе ФАПЧ является ПГ, частота колебаний (или фаза) напряжения которого изменяется в зависимости от напряжения, вырабатываемого управляющим элементом (УЭ), при этом напряжение ПГ остается неизменным. Частота напряжения ПГ является выходным сигналом системы ФАПЧ. На систему действует напряжение от эталонного генератора с частотой ωэ, этот сигнал является управляющим воздействием. Измерителем рассогласования является фазовый детектор (ФД), выходной сигнал которого является нелинейной периодической функцией разности фаз сигналов, подаваемых с ЭГ и ПГ. Сигнал с ФД через фильтр нижних частот (ФНЧ) подается на УЭ, который перестраивает частоту ПГ, приближая ее к частоте ЭГ. В установившемся режиме в системе устанавливается постоянная разность фаз между напряжениями uэ и uг, при этом напряжение на выходе ФД также будет постоянным, в результате чего частота сигнала с ПГ окажется равной частоте сигнала с ЭГ.

Начальное рассогласование частот от ЭГ и ПГ

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0014_17108192.JPG

где ωгн - начальная частота сигнала ПГ.

После включения системы ФАПЧ частота сигнала ПГ

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0015_17108224.JPG

Составляющая ωгу возникает из-за перестройки частоты ПГ и определяется выражением

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0016_17108286.JPG

где kг - коэффициент передачи ПГ по частоте; kуэ - коэффициент передачи УЭ; kд - коэффициент равный максимальному напряжению на выходе ФД; φ - разность фаз напряжений ПГ и ЭГ.

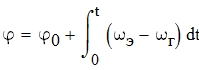
Для простоты принято, что ФНЧ отсутствует и напряжение с ФД подается на УЭ. Величина

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0017_17108302.JPG

имеющая размерность круговой частоты, определяет максимальное допустимое начальное рассогласование частот Δωн, которое может быть скомпенсировано в системе ФАПЧ, эту величину называют полосой удержания системы. В результате с учетом предыдущих выражений частота сигнала ПГ оказывается равной

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0018_17108348.JPG

Разность фаз сигналов с ЭГ и ПГ определяется выражением



где φ0 - начальное значение разности фаз.

Из последнего выражения следует, что

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0020_17108411.JPG

В установившемся режиме разность фаз φ - постоянная величина, поэтому частота сигнала ПГ равна частоте сигнала ЭГ, т.е. ошибка стабилизации частоты сигнала ПГ равна 0.

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0021_17108426.JPG

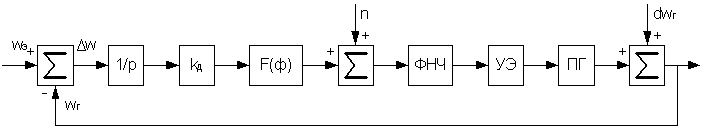
G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0022_17108458.JPG

Используя выражение для производной от фазы получим нелинейное дифференциальное уравнение для системы ФАПЧ

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0023_17108489.JPG

Данное уравнение является основным дифференциальным уравнением для системы ФАПЧ; из этого уравнения следует, что в любой момент времени алгебраическая сумма разности частот ωэ-ωн и расстройки является постоянной величиной, равной начальному рассогласованию частот сигналов ЭГ и ПГ.

Данному дифференциальному уравнению соответствует следующая структурная схема ФАПЧ



Блок 1/p позволяет выполнить операцию интегрирования, возмущение n(t) учитывает влияние на качество работы системы флуктуационной составляющей напряжения, а воздействие δωг - влияние нестабильности частоты ПГ.

2. Изложим методики оценки точности (динамические и флуктуационные ошибки), быстродействия и устойчивости статических и астатических систем (первый и второй порядок астатизма).

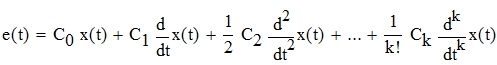
Определим оптимальные значения параметров динамических звеньев систем по критериям устойчивости и точности (минимуму квадрата суммы динамической и флуктуационной ошибок) для статической системы, и системы с первым и вторым порядком астатизма. Запас устойчивости для системы второго порядка астатизма должен составлять 60 градусов. Задающие воздействия: постоянное для статической системы, линейное для системы первого порядка астатизма, квадратичное для системы второго порядка астатизма. Входной шум белый с заданной спектральной плотностью.

Численные величины, характеризующие работу системы автоматического управления, носят название показателей качества, которые условно можно разделить на три группы: характеризующие устойчивость системы, точность системы и качество переходных процессов. Обеспечение устойчивости является необходимым условием функционирования любой системы управления и гарантирует затухание свободной или переходной составляющей процесса. К этой группе показателей относятся запасы устойчивости по амплитуде ΔL и фазе Δφ.

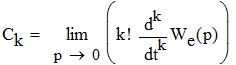
После затухания свободной составляющей через достаточно большой промежуток времени в системе протекает установившийся процесс, который обусловливает точность системы. Показателями качества в данном случае выступают величины ошибок в установившемся режиме.

Наконец, третья группа показателей относится к показателям качества переходного процесса, которые характеризуют вид процесса для достаточно малых моментов времени после начала процесса. К таким показателям в первую очередь относятся время регулирования *tp*, перерегулирование σ, устойчивость системы и ряд других.

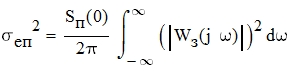
Динамическая ошибка - ошибка в установившемся режиме работы системы при действии на нее сигнала. В общем виде динамическая ошибка определяется как:



где коэффициенты Ck определяются формулой:



Флуктуационная ошибка - ошибка в установившемся режиме работы системы при действии на нее помехи. В случае, если помеха является белым шумом, то:



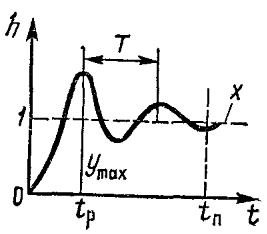
К основным показателям качества переходного процесса в системе относятся:

- длительность переходного процесса tп, равная интервалу времени с момента подачи сигнала до момента времени, когда выходной сигнал не будет отличаться от его установившегося значения не более чем на 5%;

- перерегулирование γ, равное отношению максимального значения выходного сигнала в переходном процессе к установившемуся значению;

- время установления первого максимума выходного сигнала tp, характеризующее скорость изменения выходного сигнала в переходном процессе;

- частота колебаний переходного процесса ωt=2π/T, где T - период колебаний.

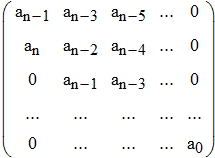


Для оценки устойчивости системы используют критерий устойчивости Гурвица. Порядок оценки следующий:

- из характеристического уравнения системы составляется уравнение вида

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0031_17108676.JPG

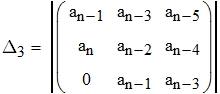
- используя данную форму записи уравнения, составляют матрицу вида



Для оценки устойчивости системы необходимо вычислить определители вида

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0033_17109097.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0034_17109128.JPG



Система будет устойчива, если при an>0 будет выполняться условие:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0036_17109191.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0037_17109222.JPG

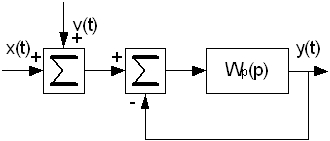
G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0038_17109238.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0039_17109269.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0040_17109284.JPG

Оптимизируем параметры системы ФАПЧ для статической системы и системы с первым и вторым порядком астатизма. Будем полагать, что задающее воздействие x(t) является детерминированной функцией вида x(t)=α01(t)+α1t+α2t2 , а возмущение случайный процесс v(t) со спектральной плотностью N0. Будем полагать, что случайный процесс действует на входе системы.

Изобразим структуру системы ФАПЧ в общем виде:



где Wp(p) передаточная функция разомкнутой системы. Будем полагать, что Wp(p) определяется простейшими структурными звеньями и имеет вид:

- для статической системы

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0043_17109347.JPG

- для системы с первым порядком астатизма

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0044_17109378.JPG

- для системы со вторым порядком астатизма

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0045_17109409.JPG

К0=КД КФНЧ КУЭ КПГ - общий коэффициент усиления разомкнутой системы.

2.1 Оптимизируем параметры системы ФАПЧ для статической системы, в которой задающее воздействие x(t) детерминированная функция, а возмущение случайный процесс v(t).

Из-за наличия в структурной схеме системы ФАПЧ интегрирующего звена первого порядка (см. структурную схему ФАПЧ) получить необходимую заданную передаточную функцию статической системы невозможно. Поэтому рассмотрим оптимизацию астатических систем первого и второго порядка астатизма.

2.2 Оптимизируем параметры системы ФАПЧ для статической системы с астатизмом первого порядка, в которой задающее воздействие x(t) детерминированная функция, а возмущение случайный процесс v(t).

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0046_17109440.JPG

В качестве критерия оптимизации используем критерий минимума среднего квадрата ошибки:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0047_17109456.JPG

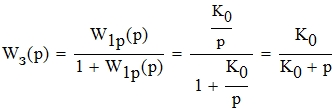
где (ex(t))2 - динамическая ошибка в системе, а Dev - дисперсия ошибки по возмущающему воздействию.

Исходные данные к расчету:

x(t)=α1t, Ny(ω)=N0=const.

2.2.1 Определим динамическую ошибку системы:

Определим передаточную функцию замкнутой системы:



Определим передаточную функцию ошибки по возмущающему воздействию:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0049_17109534.JPG

Найдем изображение ошибки управления:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0050_17109565.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0051_17109612.JPG

Найдем установившееся значение ошибки управления:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0052_17109643.JPG

2.2.2 Определим дисперсию ошибки по возмущающему воздействию:

Определим передаточную функцию по ошибки от возмущающего воздействия:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0053_17109674.JPG

Дисперсия ошибки по возмущающему воздействию находится путем интегрирования:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0054_17109721.JPG

где I(...) - интеграл Парсеваля, а Wфv(p) - передаточная функция формирующего фильтра.

Передаточная функция формирующего фильтра имеет вид:

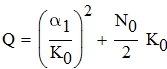
G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0055_17109752.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0056_17110174.JPG

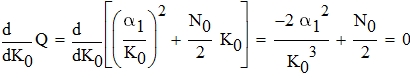
Для вычисления интеграла Парсеваля воспользуемся табличным значением:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0057_17110205.JPG

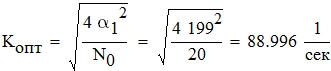
С учетом найденных динамической ошибки системы и дисперсии ошибки по возмущающему воздействию критерий качества принимает вид:



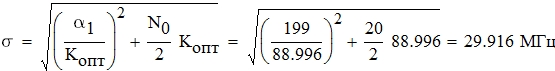
Определим оптимальное значение коэффициента усиления системы Kопт из условия минимума квадрата суммы динамической и флуктуационной ошибок при естественном ограничении K0>0:



Решая полученное уравнение, находим оптимальное значение коэффициента усиления системы Kопт:



Для полученного оптимального значения коэффициента усиления системы K1опт величина среднеквадратичной ошибки составит:



Определяем условия устойчивости исследуемой системы и значения коэффициента передачи системы, при которых система будет устойчива. Записываем характеристическое уравнение:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0063_17110408.JPG

На основе алгебраического критерия устойчивости Гурвица-Рауса требуется, чтобы все коэффициенты характеристического уравнения были положительны, т.е. требуется выполнение неравенства К0 > 0, откуда следует значение критического коэффициента усиления системы Ккрит = ∞. При этом физическая реализация такой системы оказывается невозможной из-за наличия инерционных элементов в реальных системах.

2.3 Оптимизируем параметры системы ФАПЧ для статической системы с астатизмом второго порядка, в которой задающее воздействие x(t) детерминированная функция, а возмущение случайный процесс v(t).

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0064_17110439.JPG

где Tф моделирует инерционность фильтра. В качестве критерия оптимизации используем критерий минимума среднего квадрата ошибки:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0065_17110470.JPG

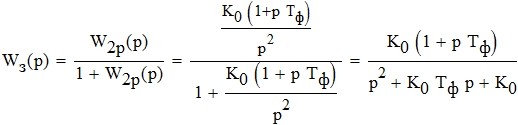
где (ex(t))2 - динамическая ошибка в системе, а Dev - дисперсия ошибки по возмущающему воздействию.

Исходные данные к расчету:

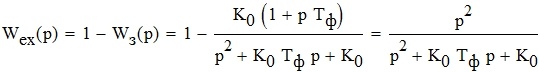
x(t)=α2t2, Ny(ω)=N0=const.

23.1 Определим динамическую ошибку системы:

Определим передаточную функцию замкнутой системы:

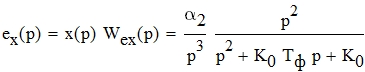


Определим передаточную функцию ошибки по возмущающему воздействию:

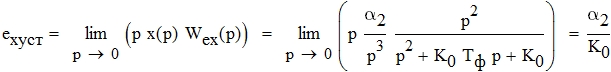


Найдем изображение ошибки управления:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0068_17110610.JPG

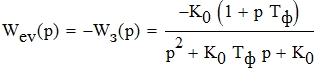


Найдем установившееся значение ошибки управления:



2.3.2 Определим дисперсию ошибки по возмущающему воздействию:

Определим передаточную функцию по ошибки от возмущающего воздействия:



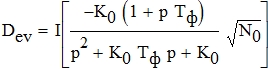
Дисперсия ошибки по возмущающему воздействию находится путем интегрирования:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0072_17110766.JPG

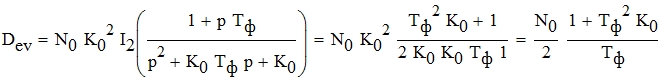
где I(...) - интеграл Парсеваля, а Wфv(p) - передаточная функция формирующего фильтра.

Передаточная функция формирующего фильтра имеет вид:

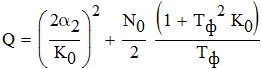
G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0073_17110798.JPG



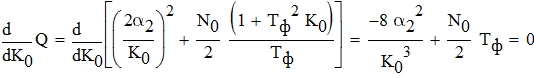
Для вычисления интеграла Парсеваля воспользуемся табличным значением:

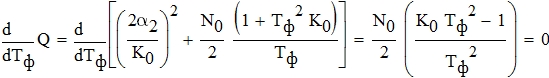


С учетом найденных динамической ошибки системы и дисперсии ошибки по возмущающему воздействию критерий качества принимает вид:



Определим оптимальное значение коэффициента усиления системы Kопт и постоянной времени фильтра Топт из условия минимума квадрата суммы динамической и флуктуационной ошибок при естественном ограничении K0>0 и Тф>0 :

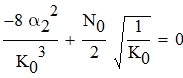




Решая полученное уравнение, находим оптимальные значение коэффициента усиления системы Kопт и постоянной времени фильтра Топт. Из второго уравнения находим оптимальное значение постоянной времени фильтра Топт:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0079_17111032.JPG

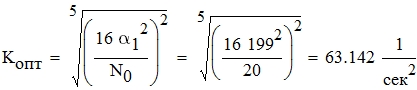
Подставив полученное оптимальное значение постоянной времени фильтра Топт в первое уравнение получаем оптимальное значение коэффициента усиления системы Kопт:



G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0081_17111078.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0082_17111125.JPG

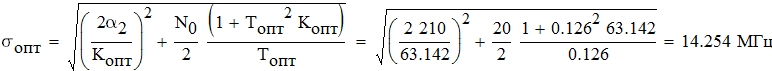
Решая полученное уравнение, находим оптимальное значение коэффициента усиления системы Kопт:



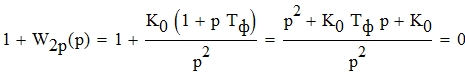
Для полученного оптимального значения коэффициента усиления системы Kопт:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0085_17111203.JPG

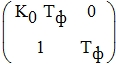
Для полученных оптимальных значений коэффициента усиления системы Kопт и постоянной времени фильтра Топт величина среднеквадратичной ошибки составит:



Определяем условия устойчивости исследуемой системы и значения коэффициента передачи системы, при которых система будет устойчива. Записываем характеристическое уравнение:



Составляем из коэффициентов характеристического уравнения матрицу Гурвица:



В соответствии с критерием устойчивости Гурвица для того, чтобы система была устойчива необходимо и достаточно, чтобы все определители Гурвица были положительны. Раскрывая определители, получим следующие условия устойчивости:

K0> 0;

К0Тф > 0.

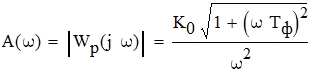
2.3.3 Дополнительным требованием задания является величина запаса устойчивости для системы второго порядка астатизма, которая должна составлять 600.

Находим выражение для построения логарифмических частотных характеристик

1) Находим комплексную частотную характеристику разомкнутой системы:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0089_17112046.JPG

2) Находим амплитудно-частотную характеристику разомкнутой системы:

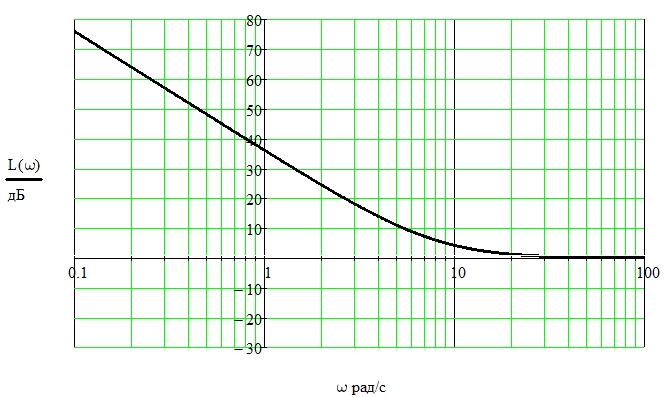


Логарифмируя полученное выражение, находим ЛАЧХ:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0091_17112124.JPG

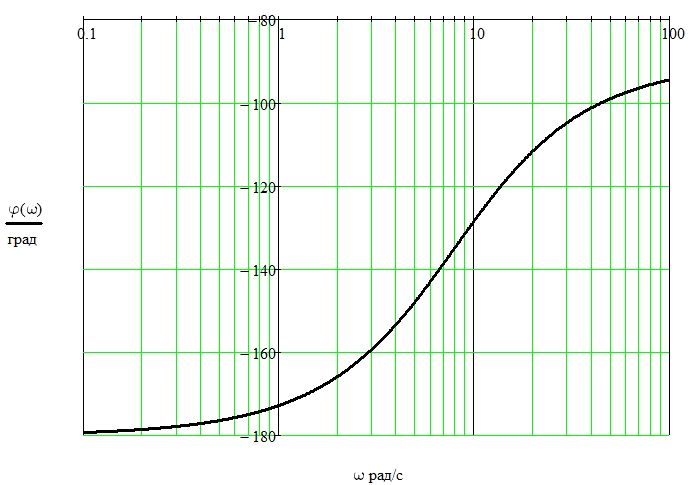
Подставим ранее найденные значения Копт и Топт:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0092_17112155.JPG



3) Находим фазо-частотную характеристику разомкнутой системы:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0096_17112280.JPG



Из графиков определяем запас устойчивости по фазе - запас устойчивости системы по фазе фзап показывает, на какое значение ФЧХ разомкнутой системы на частоте среза ωс отличается от π (180 град), ωс - частота среза системы определяется по графику ЛАЧХ как частота, на которой коэффициент усиления равен 0 дБ (корень уравнения L(ω)=0):

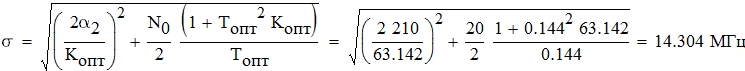
G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0100_17112389.JPG

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0101_17112420.JPG

Чтобы величина запаса устойчивости для системы второго порядка астатизма составила 600 градусов, увеличим значение постоянной времени фильтра Tопт:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0103_17112451.JPG

Для полученных оптимальных значений коэффициента усиления системы Kопт и постоянной времени фильтра Топт величина среднеквадратичной ошибки составит:



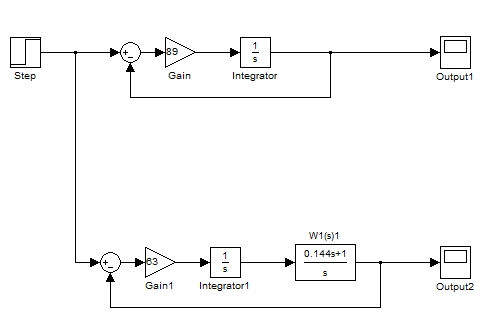
При наложении дополнительного условия по запасу устойчивости по фазе среднеквадратичная ошибка возрастает относительно своего оптимального значения на:

G:\XALTURA\Радиоавтоматика\Вариант 10_images\IMG0105_17112872.JPG

3. Произведем имитационное моделирование системы ФАПЧ по эквивалентной структурной схеме в среде моделирования MatLab.

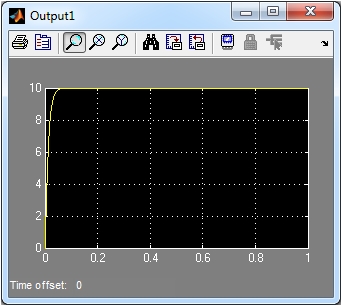
В подразделе визуального программирования Simulink составим эквивалентную структурную схему системы ФАПЧ и для заданных исходных данных, использованных для расчетов в пункте 2, проверим длительность переходного процесса, уровень динамических и флуктуационных ошибок. Последовательно моделируются астатическая система и системы с первым и вторым порядком астатизма.

3.1 Произведем моделирование переходного процесса для системы с астатизмом первого и второго порядка. Для этого соберем в пакете MatLab Simulink модель с параметрами, определенными ранее расчетным путем.

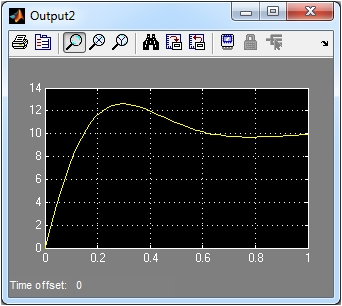


Подадим на вход схемы ступенчатую функцию.

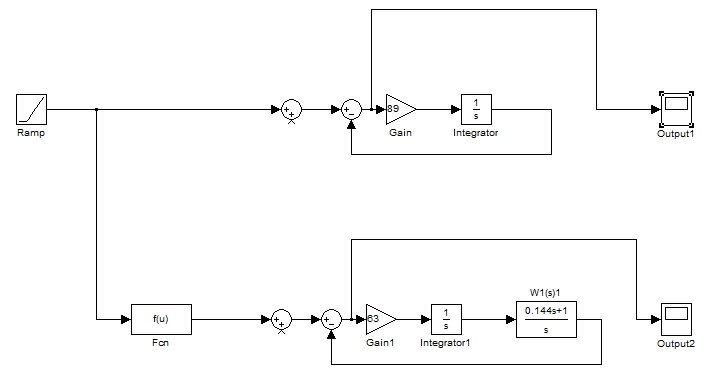
Сигнал на выходе системы с астатизмом первого порядка имеет вид.



Сигнал на выходе системы с астатизмом второго порядка имеет вид.

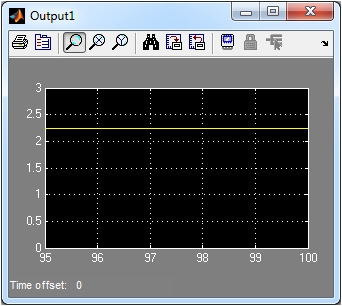


3.2 Произведем моделирование уровня динамических ошибок для системы с астатизмом первого и второго порядка. Для этого соберем в пакете MatLab Simulink модель с параметрами, определенными ранее расчетным путем.

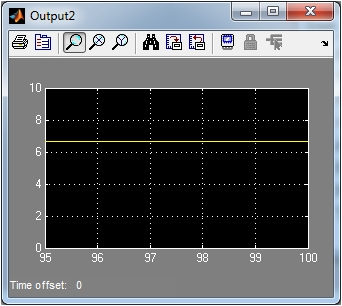


Подадим на вход схемы функцию вида α1t для системы с астатизмом первого порядка и функцию вида α2t2 для системы с астатизмом второго порядка.

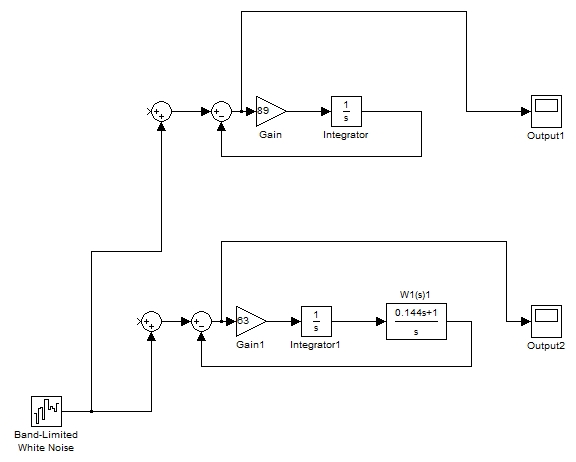
Динамическая ошибка системы с астатизмом первого порядка имеет вид.



Динамическая ошибка системы с астатизмом второго порядка имеет вид.

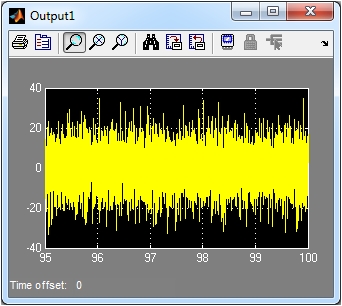


3.3 Произведем моделирование уровня флуктуационных ошибок для системы с астатизмом первого и второго порядка. Для этого соберем в пакете MatLab Simulink модель с параметрами, определенными ранее расчетным путем.

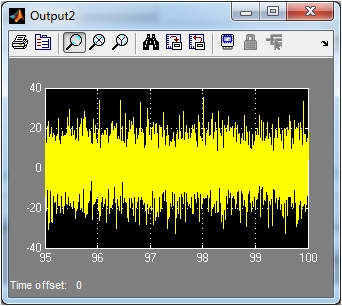


Подадим на вход схемы функцию белый шум со спектральной плотностью N0.

Флуктуационная ошибка системы с астатизмом первого порядка имеет вид.



Флуктуационная ошибка системы с астатизмом второго порядка имеет вид.



Литература

1.Теория автоматического управления. Конспект лекций: В 2ч. Ч.1:

Линейные непрерывные системы : учеб.-метод. Пособие /В.П.Кузнецов, С.В.Лукьянец, М.А.Крупская.-Мн.:БГУИР, 2007.-132с.

2.Теория автоматического управления. Конспект лекций: В 2ч. Ч.2:

Дискретные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учеб.-метод. Пособие /В.П.Кузнецов, С.В.Лукьянец, М.А.Крупская.-Мн.:БГУИР, 2007.-160с.

3.Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика.-Москва: Высшая школа,1990.-334с.

4.Электронный учебно-методический комплекс: Теория автоматического управления. Ч.1: Линейные непрерывные системы./ В.П. Кузнецов, С.В. Лукьянец, М.А. Крупская- Мн.:БГУИР, 2006.

5.Электронный учебно-методический комплекс: Теория автоматического управления. Ч.2:Дискретные,нелинейные, оптимальные и адаптивные системы /С.В. Лукьянец, А.Т.Доманов, В.П.Кузнецов., М.А.Крупская-Мн.:БГУИР, 2007.