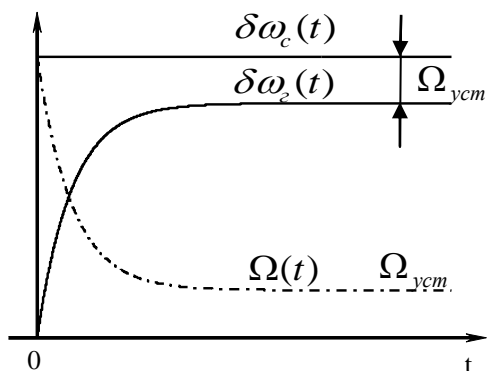


ФГОУ ВО
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ РАДИОАВТОМАТИКИ ПО ИХ НЕЛИНЕЙНЫМ МОДЕЛЯМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторной работе № 5 по дисциплине
«Радиоавтоматика»
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
и направления 11.03.01 «Радиотехника»



Воронеж 2019

Составитель: канд. техн. наук А.В. Володько

УДК 621.396

Исследование систем радиоавтоматики по их нелинейным моделям: методические указания к лабораторной работе № 5 по дисциплине «Радиоавтоматика» для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и направления 11.03.01 «Радиотехника»/ФГОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А.В. Володько. Воронеж, 2019. 30 с.

Работа содержит практические и лабораторные задания исследования систем радиоавтоматики по их нелинейным моделям. В методических указаниях содержатся необходимые для этого расчетно-методические материалы.

Предназначено для студентов специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле Лабораторная работа №5.pdf

Ил. 7. Библиогр.: 2 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доцент С.М. Федоров

Ответственный за выпуск зав. кафедрой
д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.С. Балашов

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета.

© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2019

1. Общие указания

1.1. Цель работы

Целью настоящей работы является:

– углубление знаний об основных нелинейных явлениях в следящих системах радиоавтоматики – в системах частотной (ЧАП) и фазовой (ФАП) автоподстройки частоты;

– приобретение опыта анализа нелинейных следящих систем;

– практическое освоение принципов моделирования следящих систем радиоавтоматики первого порядка по их нелинейным моделям;

– приобретение навыков использования метода фазовой плоскости для анализа характера процессов в нелинейных следящих системах;

– освоение методики определения с помощью ЭВМ установившихся ошибок и полос захвата и удержания в системах ЧАП и ФАП первого порядка по их нелинейным моделям.

Первая (подготовительная) часть работы заключается в подготовке исходных данных для моделирования на ЭВМ систем ЧАП и ФАП первого порядка по моделям с нелинейными звеньями и включает:

– аппроксимацию нелинейной дискриминационной характеристики;

– составление нелинейных дифференциальных уравнений состояния;

– переход к рекуррентным разностным уравнениям, являющимся базовыми для моделирования процессов в системах на ЭВМ;

– выбор шага моделирования (дискретизации);

– подготовка формул для определения частот захвата и удержания;

– теоретический расчет фазовых траекторий и координат точек равновесия.

В лаборатории (дисплейном классе) непосредственно осуществляется моделирование процесса отработки входных воздействий исследуемыми нелинейными системами (ЧАП и ФАП первого порядка) на ЭВМ при малых и больших рассогласованиях, экспериментальное определение остаточных расстроек, полос захвата и удержания систем. В работе используется IBM-совместимый персональный компьютер и прикладная программа «L5».

1.2. Исследуемые системы и явления

Исследованию подлежат рассматривавшиеся ранее в работах № 1 ÷ 4 системы ЧАП и ФАП. Однако теперь их структурные схемы составлены с учетом нелинейности статических характеристик дискриминаторов. Таким образом, более не предполагается, что процессы изменения рассогласования в системах не выходят за пределы линейных участков статических дискриминационных характеристик (СДХ): ± 1 рад для фазового дискриминатора (ФД) и $\pm \Omega_{\max}$ для частотного дискриминатора (ЧД), где Ω_{\max} – половина ширины апертуры дискриминационной характеристики.

Из-за сложности анализа систем по нелинейным моделям в работе следует ограничиться учетом самых важных инерционностей в устройствах: для системы ЧАП – это учет инерционности частотного дискриминатора, осуществляемый введением в структурную схему инерционного звена с постоянной времени T , а для системы ФАП – учет преобразования частоты перестраиваемого генератора в фазу, описываемый в структурной схеме интегрирующим звеном с передаточной функцией $1/p$ (рис. 3). Регулировочная характеристика перестраиваемого генератора в исследуемых системах предполагается линейной (с крутизной S_p) вне зависимости от величины управляющего напряжения $u_\phi(t)$ с выхода звена, описываемого коэффициентом усиления K_k и согласующего выход дискриминатора и вход управляемого

генератора. Таким образом, исследованию подлежат системы, структурные схемы которых приведены на рис. 1.

Исходное состояние систем предполагается следующим. Частота сигнала ω_c считается равной номинальной частоте (частоте покоя) перестраиваемого генератора ω_{c0} плюс промежуточная частота $\omega_{np} = \omega_0$, где ω_0 – переходная частота ЧД, равная частоте опорного генератора. Таким образом, в исходном состоянии в системе ЧАП текущие отклонения частот нулевые: $\delta\omega_c(t) = 0$, $\delta\omega_r(t) = 0$, рассогласования нет: $\Omega(t) = 0$, $u_\phi(t) = 0$, а в системе ФАП, кроме того, начальные фазы всех колебаний равны нулю.

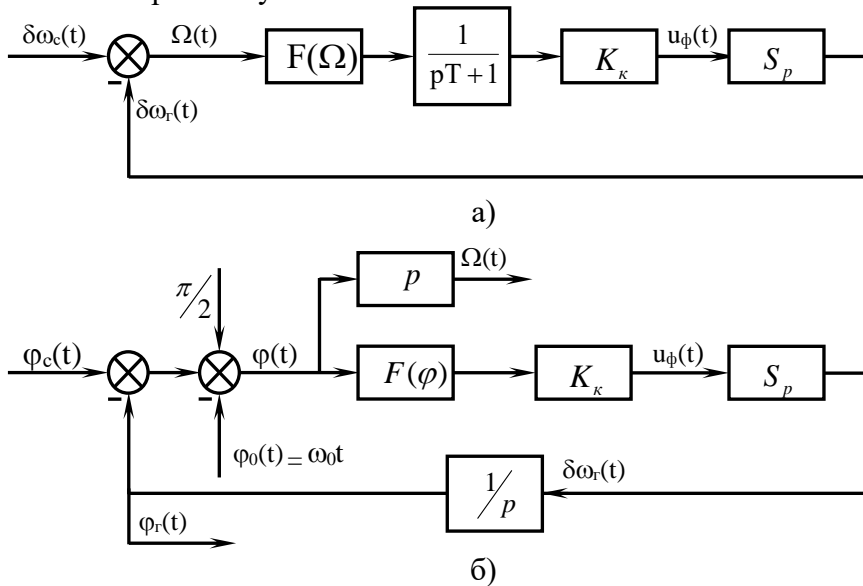


Рис. 1. Структурные схемы исследуемых систем

Очевидно, что для анализа динамики рассматриваемых систем можно положить равными нулю все номинальные значения частот: ω_{c0} , ω_{np} , ω_0 , ω_c . Это позволит оперировать в дальнейшем только отклонениями частот от их номинальных значений, а текущие фазы $\varphi_c(t)$, $\varphi(t)$, $\varphi_r(t)$

трактовать как отклонения от «номинальных» линейных функций $\omega_c t$, $\omega_0 t$, $\omega_{20} t$ (рис. 2).

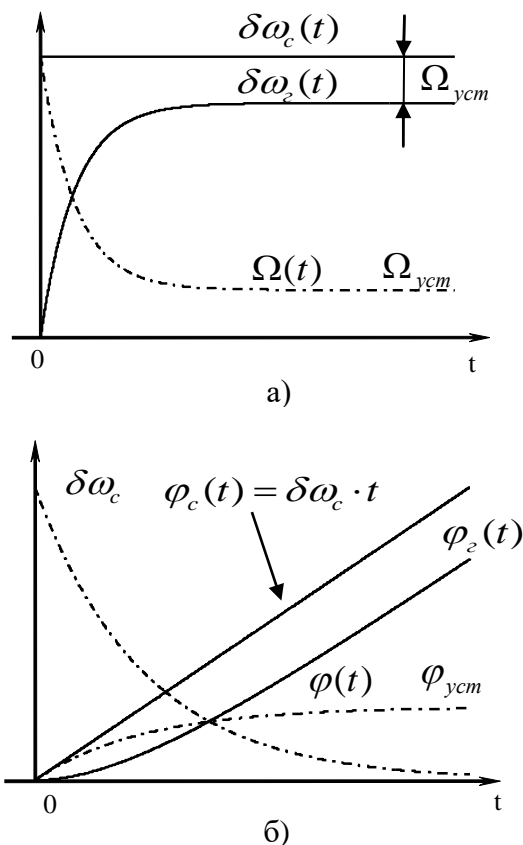


Рис. 2. Изменения сигналов (частот и фаз) в структурных схемах систем при малых скачках частоты исходного сигнала: а) ЧАП; б) ФАП

Поскольку в системах автоподстройки частоты интересуются обычно реакцией системы на изменение частоты входного сигнала, то структурная схема системы ФАП, составленная относительно текущей фазы сигнала $\varphi_c(t)$, не всегда наглядна. Поэтому при анализе процессов в такой системе полезно перейти от структурной схемы

(рис. 1,б) к эквивалентной схеме (рис. 3,б), содержащей в явном виде частоту входного сигнала $\delta\omega_c(t)$ и рассогласование (ошибку) слежения по частоте $\Omega(t)$. Переход к этой схеме пояснен на рис. 3,а. При подготовке к работе необходимо уяснить его правомерность. Для этого достаточно изучить одно из правил структурных преобразований – перенос линейного звена через сумматор по направлению распространения процессов в системе, – которое можно найти, например, в учебнике [1].

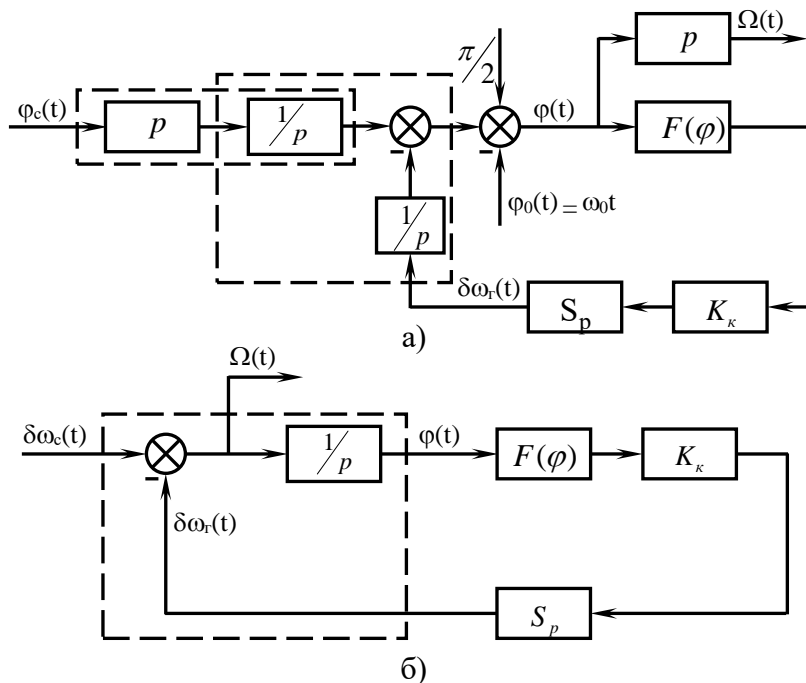


Рис.3. Структурная схема исследуемой системы ФАП с задающим воздействием в виде изменяющейся фазы (а) и частоты (б).

Во всех расчетах и при моделировании системы ЧАП необходимо использовать кусочно-линейную аппроксимацию статической дискриминационной характеристики частотного дискриминатора следующего типа (рис. 4,а):

$$F(\Omega) = \begin{cases} S_{\delta} \cdot \Omega, & \text{при } |\Omega| \leq \Omega_{\max}, \\ 0, & \text{при } |\Omega| > \Omega_{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

Для системы ФАП используется простейшая аппроксимация дискриминационной характеристики фазового дискриминатора (рис. 4,б):

$$F(\varphi) = S_{\delta} \cdot \sin \varphi. \quad (2)$$

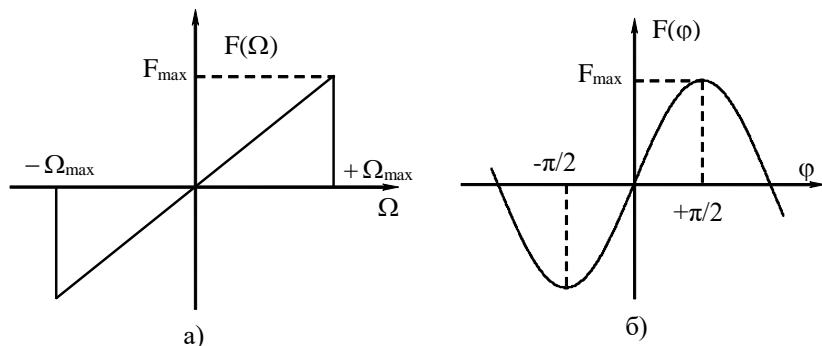


Рис. 4. Функции, аппроксимирующие нелинейные СДХ ЧД (а) и ФД (б)

Максимальное напряжение F_{\max} на выходе каждого дискриминатора и соответствующая этому напряжению максимально возможная расстройка частоты перестраиваемого генератора от ее номинального значения, определяемая как $\Omega_{e \max} = F_{\max} K_{\kappa} S_{\rho}$, являются важнейшими параметрами систем и их следует определить перед началом расчетов (см. первое подготовительное задание).

В работе исследуются следующие нелинейные явления, физическое существо которых необходимо уяснить перед началом работы.

Динамический срыв слежения в системе ЧАП, то есть превышение рассогласования в системе $\Omega(t)$ значения, равного половине ширины апертуры дискриминатора: $\Omega > \Omega_{\max}$. Такое явление может возникнуть из-за мгновенного скачка частоты

входного сигнала – задающего воздействия $\delta\omega_c(t) = \delta\omega_c \cdot 1(t)$ в схеме (рис. 4,а), – если его величина $\delta\omega_c > \Omega_{\max}$. Это приведет к размыканию системы ЧАП и прекращению слежения.

Квазистационарный срыв слежения в статической системе ЧАП, возникающий при постепенном («бесконечно медленном») уходе частоты входного сигнала $\delta\omega_c(t)$ от номинального значения. При медленном изменении частоты $\delta\omega_c(t)$ инерционность системы мала и статическая ошибка в системе $\Omega_{уст}$ нарастает по мере увеличения входной частоты практически синхронно. В конце концов, как только эта ошибка $\Omega_{уст}$, равная при работе на линейном участке СДХ $\delta\omega_c / (1 + S_d K_k S_p)$, достигает при $\delta\omega_c = \delta\omega_{c,yd}$ величины Ω_{\max} , то наступает явление срыва, характеризуемое полосой удержания $\delta\omega_{c,yd}$. Причина этого явления заключается в той же нелинейности статической дискриминационной характеристики. Ясно, что при наличии интегратора в контуре системы ЧАП квазистационарного срыва слежения в этой системе не было бы, так статическая ошибка в ней была бы нулевой: $\Omega_{уст} = 0$, то есть оставалась бы всегда меньше Ω_{\max} . Поскольку на практике системы ЧАП создаются прежде всего для отслеживания медленных уходов частоты $\delta\omega_c(t)$, то основной их характеристикой является именно полоса удержания $\delta\omega_{c,yd}$ в квазистационарном режиме.

В системе ФАП за счет скачка частоты $\delta\omega_c$ невозможно создать скачка фазы на входе нелинейного элемента $F(\varphi)$. Это особенно ясно видно при анализе системы по структурной схеме, представленной на рис. 3,б: скачок частоты $\delta\omega_c(t) = \delta\omega_c \cdot 1(t)$ интегрируется звеном с передаточной функцией $1/p$ и на его выходе, то есть на входе нелинейного звена $F(\varphi)$, сигнал не может иметь скачка. Поэтому невозможно попасть на нелинейный участок СДХ, не

пройдя последовательно все ее точки. Такой проход можно осуществить подачей одного большого скачка частоты $\delta\omega_c$ или серией мелких скачков. Итог будет одним и тем же: нелинейный эффект, называемый в этих системах срывом синхронизма, проявится при одной и той же величине ухода частоты $\delta\omega_c = \delta\omega_{c,yd}$, вызвавшей увеличение фазы сигнала $\varphi(t)$ до уровня, превосходящего $\pi/2$.

Так как исследуемая система ФАП (рис. 3,б) имеет астатизм первого порядка, то установившаяся ошибка $\Omega_{уст}$ в режиме синхронизма будет равна нулю при любых скачках $\delta\omega_c < \delta\omega_{c,yd}$, то есть частота перестраиваемого генератора будет совпадать с частотой входного сигнала. При достижении $\varphi(t) = \pi/2$ (при $\delta\omega_c = \delta\omega_{c,yd}$) генератор перестроится на максимально возможную величину $\Omega_{c,max} = F_{max} K_c S_p = S_d K_c S_p$. Если затем увеличить уход частоты $\delta\omega_c$, то на входе интегратора в схеме на рис. 3,б появится ненулевой сигнал, который будучи проинтегрированным приведет к безостановочному то замедляющемуся, то ускоряющемуся нарастанию фазы $\varphi(t)$. Эта фаза как бы «поползет» по оси абсцисс дискриминационной характеристики $F(\varphi)$, и напряжение на выходе ФД начнет пульсировать из-за периодичности СДХ. В такт с этими пульсациями будет перестраиваться частота перестраиваемого генератора. Появится периодическая частотная модуляция его сигнала $\omega_c(t)$, но невозможность увеличения частоты более чем на величину $S_d K_c S_p$ не позволит этой частоте скомпенсировать скачок $\delta\omega_c > \delta\omega_{c,yd}$ и достичь расстройки $\Omega = 0$. В таком асинхронном режиме (с модуляцией периодического генератора) система ФАП будет пребывать, пока входное воздействие не вернется к уровню $\delta\omega_c < \delta\omega_{c,yd}$. При этом система снова «захватит» входной сигнал, то есть обработает полностью рассогласование $\Omega = \delta\omega_c - \delta\omega_c$. Ясно, что

полоса удержания $\delta\omega_{c,yd}$ и полоса захвата $\delta\omega_{c,z}$ в этом случае равны друг другу.

2. Подготовительные задания и указания по их выполнению

2.1. Задание первое

Ознакомьтесь с содержанием работы, исследуемыми нелинейными явлениями в следящих системах радиоавтоматики. Занесите в отчет структурные схемы исследуемых нелинейных систем ЧАП и ФАП. Аппроксимируйте нелинейные СДХ дискриминаторов анализируемых систем в соответствии с указаниями к работе, занесите необходимые выражения и графики в отчет. Укажите количественные значения параметров всех входящих в системы ЧАП и ФАП звеньев.

Для выполнения задания достаточно проработать общие указания к работе и просмотреть предлагаемые лабораторные задания.

Помимо структурных схем, приведенных на рис. 3, целесообразно представить в отчете схему системы ФАП с задающим воздействием в виде изменяющейся частоты.

Параметры звеньев, входящих в исследуемые нелинейные системы ЧАП и ФАП, необходимо взять в соответствии с номером Вашего варианта (N), заранее выданным преподавателем:

– $\Omega_{\max} = 1.5N \text{ рад/с}$ – половина ширины апертуры СДХ ЧД;

– $T = 0.1N \text{ с}$ – постоянная времени инерционного звена нелинейной системы ЧАП;

– $K_0 = S_o K_\kappa S_p = 2N$ – результирующий коэффициент усиления (добротность) следящей системы (для системы ФАП имеет размерность рад/с);

– $\Omega_{c \max} = F_{\max} K_\kappa S_p$ – максимально возможное отклонение частоты перестраиваемого генератора от

номинального значения; для системы ЧАП –
 $\Omega_{c\max} = K_0 \Omega_{\max} = 3N^2 \text{ рад/с}$, для ФАП –
 $\Omega_{c\max} = K_0 = 2N \text{ рад/с}$.

Числовые значения остальных параметров $S_\delta, K_\kappa, S_p, F_{\max}$ по мере необходимости могут быть заданы Вами самостоятельно в рамках приведенных соотношений и с учетом имеющегося у Вас опыта анализа систем ЧАП и ФАП.

2.2. Задание второе

Определите, какой величины скачок частоты входного сигнала $\delta\omega_{c\text{доп}}$ допустим, чтобы реакцию систем ЧАП и ФАП на него можно было анализировать, не прибегая к нелинейным моделям.

Ответ на поставленный вопрос для системы ЧАП определяется следующими соображениями. В первый момент времени после скачка частоты входного сигнала перестраиваемый генератор не успеет изменить частоты из-за инерционности дискриминатора, а значит рассогласование в системе Ω примет значение, равное $\delta\omega_c$ (рис. 3,а). Если эта величина не превосходит половины апертуры статической дискриминационной характеристики Ω_{\max} , то есть если $\delta\omega_c < \Omega_{\max}$, то анализ системы можно вести по линейной модели. Определите $\delta\omega_{c\text{доп}}$ для Вашей системы ЧАП.

При скачке частоты на входе системы ФАП разность фаз φ на входе ФД скачком измениться не может (рис. 3,б). Однако она будет быстро нарастать. Из анализа системы ФАП по линейной модели известно, что по истечению времени переходного процесса t_y рассогласование примет значение близкое к $\varphi_{y\text{ст}} = \delta\omega_c / K_0$, где $K_0 = S_\delta K_\kappa S_p$ – добротность системы. За граничную величину линейного участка СДХ фазового детектора обычно принимается величина $\varphi_{\max} = \pm 1 \text{ рад}$, что позволяет определить допустимую

входную расстройку сигнала по частоте $\delta\omega_{c\text{дон}} = K_0$. Найдите значение этой величины для Вашей системы. Сопоставьте его с аналогичным значением, полученным для системы ЧАП.

2.3. Задание третье

Составьте рекуррентные формулы для моделирования выходных процессов и рассогласования в анализируемых нелинейных системах ЧАП и ФАП первого порядка. Выберите шаг дискретизации (моделирования). Для выполнения задания проработайте представленный ниже материал.

Пусть анализируемая нелинейная следящая система радиоавтоматики представлена обобщенной структурной схемой, показанной на рис. 7.

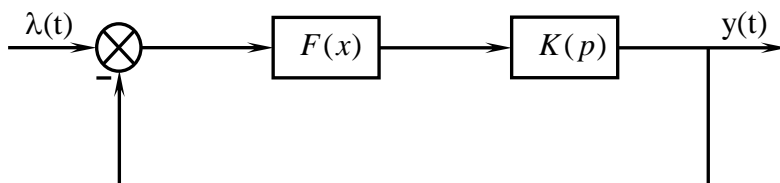


Рис. 5. Обобщенная структурная схема нелинейной следящей системы

Здесь $\lambda(t)$ – мгновенное значение входного (задающего) воздействия, $y(t)$ – реакция нелинейной системы, $x(t)$ – текущая расстройка (ошибка) системы, $F(x)$ – нелинейная СДХ (рис. 4), $K(p)$ – передаточная функция линейной части контура системы.

Рассмотрим более сложный случай конфигурации линейной части системы, нежели предлагаемый Вам для анализа. Пусть передаточная функция линейной части контура системы $K(p) = K_k S_p / (p(pT + 1))$, то есть анализируемая система – система второго порядка.

Операторное уравнение, связывающее реакцию системы $y(t)$ и расстройку $x(t)$, выглядит следующим образом:

$$y(t) = \frac{K_{\kappa} S_p}{p(pT + 1)} \{F[x(t)]\},$$

а с учетом уравнения замыкания системы $x(t) = \lambda(t) - y(t)$:

$$y(t) = \frac{K_{\kappa} S_p}{p(pT + 1)} \{F[\lambda(t) - y(t)]\}. \quad (2)$$

Перейдя к явной форме записи дифференциального оператора $p = d/dt$, получим нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$T \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} - K_{\kappa} S_p F[\lambda(t) - y(t)] = 0. \quad (3)$$

Проинтегрировав данное уравнение, с учетом равенства нулю постоянных интегрирования получим

$$T \frac{dy}{dt} + y(t) - K_{\kappa} S_p \int F[\lambda(t) - y(t)] dt = 0. \quad (4)$$

Примем функцию $\psi(t) = K_{\kappa} S_p \int F[\lambda(t) - y(t)] dt$ за первую переменную (функцию) состояния системы. В качестве второй переменной состояния возьмем непосредственно процесс $y(t)$. Тогда из последнего уравнения вытекает система дифференциальных уравнений (первого порядка) состояния системы

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = K_{\kappa} S_p F[\lambda(t) - y(t)], \\ \frac{dy}{dt} = \frac{1}{T} [\psi(t) - y(t)], \end{cases} \quad (5)$$

которую удобно положить в основу моделирования анализируемой нелинейной системы на ЭВМ. Начальные условия для переменных состояния в момент включения

системы при отсутствии напряжения на накопительных элементах ее инерционных звеньев определяются как $y(0) = 0$ и $\psi(0) = T \cdot y'(0) + y(0) = 0$. Для их вычисления использованы простые физические соображения и одно из представленных выше уравнений.

Более подробно с методикой перехода от исходного дифференциального уравнения n -го порядка, описывающего процессы в нелинейной системе, к системе из n дифференциальных уравнений (состояния) первого порядка можно ознакомиться, например, в [2].

В нашем случае для анализа посредством моделирования предлагается нелинейные системы первого порядка, поэтому процессы в каждой из них описываются лишь одним дифференциальным уравнением состояния с единственной переменной состояния $y(t)$. Однако Вам необходимо учесть, что при упрощении передаточной функции $K(p)$ разомкнутой системы необходимо заново осуществить построение модели по переменным состояния, поскольку при исключении из системы какого-либо звена модель, представленная выше, будет принципиально неверна.

Переход от непрерывных дифференциальных уравнений состояния к разностным рекуррентным уравнениям относительно искомым функций $\psi(t)$ и $y(t)$ осуществим с использованием уже известного Вам по работам №2 и №4 метода Эйлера:

$$\begin{cases} \psi(t_{i+1}) = \psi(t_i) + K_k S_p F[\lambda(t_i) - y(t_i)]T_\Delta, \\ y(t_{i+1}) = y(t_i) + \frac{1}{T} [\psi(t_i) - y(t_i)]T_\Delta, \end{cases} \quad (6)$$

где $t_i = i \cdot T_\Delta$,

$t_0 = 0$: $y(t_0) = y(0) = 0$, $\psi(t_0) = \psi(0) = 0$, $\lambda(t_0) = \lambda(0)$, T_Δ – шаг дискретизации (моделирования).

Занесите вывод разностных рекуррентных уравнения для Ваших систем в отчет по работе. Обратите внимание, что одно и то же физическое явление – скачок частоты входного сигнала на величину $\delta\omega_c$ – при рассмотрении системы ЧАП и ФАП по модели рис. 3 математически описываются по-разному (рис. 4): для системы ЧАП – это полином нулевой степени ($M=0$) – $\delta\omega_c(t) = \delta\omega_c \cdot 1(t)$, а для системы ФАП – полином первой степени ($M=1$) – $\varphi_c(t) = \delta\omega_c \cdot t \cdot 1(t)$. Это необходимо помнить при моделировании задающего воздействия $\lambda(t) = A \cdot t^M$ в системе ФАП, если используется структурная схема на рис. 1. При использовании математической модели рис. 3,б указанное различие в описании задающих воздействий исчезает.

Величину шага дискретизации T_0 для обеих систем (ЧАП и ФАП) оцените аналитически в соответствии с п. 2.3 лабораторно-практического занятия №4, при совпадении вариантов задания по данной и предыдущей работам возьмите в качестве T_0 ранее выбранное Вами значение.

2.4. Задание четвертое

Получите формулы для расчета фазовых траекторий анализируемых нелинейных систем ЧАП и ФАП первого порядка при воздействии скачка частоты $\delta\omega_c$. Приведите соответствующую графическую интерпретацию для случая $\delta\omega_c = 0.5\delta\omega_{c\text{дон}}$.

Под фазовой траекторией следящей системы первого порядка понимается зависимость скорости изменения расстройки в системе от величины самой расстройки. Для построения фазовых траекторий исследуемых систем необходимо записать дифференциальные уравнения систем относительно расстроек $\Omega(t)$ и $\varphi(t)$. В операторной форме такое дифференциальное уравнение для обобщенной

структурной схемы нелинейной следящей системы (рис. 5) выглядит так:

$$x(t) = \lambda(t) - K(p)\{F[x(t)]\}. \quad (7)$$

Затем уравнения систем (ЧАП и ФАП) следует представить в виде $dx/dt = \Phi(x)$. Для приведения этих уравнений к безразмерной форме введите в рассмотрение безразмерные дискриминационные характеристики обеих систем ($\tilde{F}(x)$), пронормировав их СДХ ($F(x)$, рис. 4) к величине максимального выходного напряжения F_{\max} : $F(x) = F_{\max} \cdot \tilde{F}(x)$, и поделите обе части уравнений $dx/dt = \Phi(x)$ на величину $\Omega_{z \max} = F_{\max} K_{\kappa} S_p$ – наибольшего возможного отклонения частоты перестраиваемого генератора, соответствующего напряжению F_{\max} , от номинального значения, соответствующего напряжению на выходе дискриминатора. Изобразите в безразмерных координатах фазовой плоскости фазовые траектории анализируемых нелинейных систем:

$$\frac{T}{\Omega_{z \max}} \frac{d\Omega}{dt} = \Phi\left(\frac{\Omega}{\Omega_{z \max}}\right), \quad \frac{1}{\Omega_{z \max}} \frac{d\varphi}{dt} = \Xi(\varphi), \quad (8)$$

как показано на рис. 6, полагая, что относительное значение скачка частоты входного сигнала $\delta\omega_c / \Omega_{z \max} = 0.5 \delta\omega_{c \text{ don}} / \Omega_{z \max} < 1$.

Из рис. 6,а, например, видно, что если в момент включения системы ЧАП напряжение на накопительных элементах ее инерционного звена отсутствует, то при исходной расстройке в системе $\Omega = \delta\omega_c$ начальное значение нормированной скорости изменения ошибки слежения $T/\Omega_{z \max} \cdot d\Omega/dt|_{t=0}$ определяется ординатой точки а'. Далее система перейдет в

устойчивое состояние равновесия – точка a'' , – успешно отследив указанное входное воздействие: $\Omega_{уст}$ – абсцисса точки a'' .

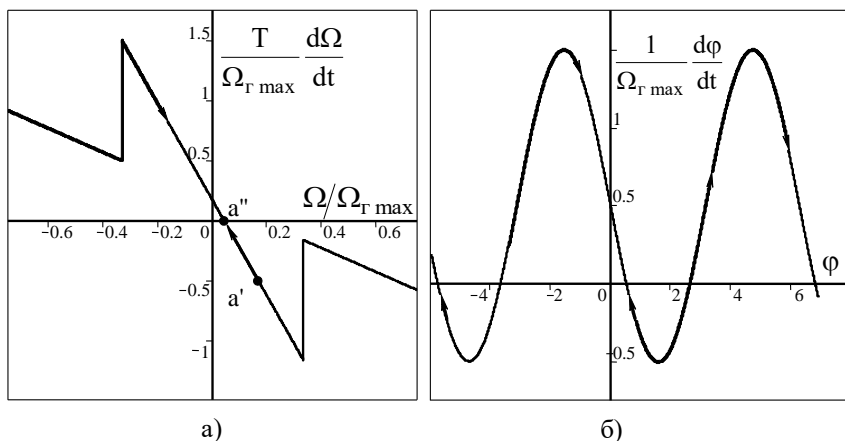


Рис. 6. Фазовые траектории анализируемых систем ЧАП (а) и ФАП (б) при воздействии скачка частоты $\delta\omega_c = 0.5\delta\omega_{c\text{дон}}$ для $K_0 = 3$ (апертура ЧД $2\Omega_{\text{max}} = 10 \text{ рад/с}$)

2.5. Задание пятое

Определите полосы удержания $\delta\omega_{c\text{уд}}$ и захвата $\delta\omega_{c\text{з}}$ обеих рассматриваемых нелинейных систем. Изобразите фазовые портреты систем ЧАП и ФАП и укажите на них точки устойчивого и неустойчивого равновесия.

Фазовым портретом системы называют совокупность фазовых траекторий, построенных для различных начальных условий и определяющих все возможные процессы в системе. При построении фазовых портретов анализируемых систем следует использовать выражения и графики фазовых траекторий, полученные в предыдущем задании, а числовые значения величины входного скачка частоты взять следующими: $\delta\omega_c = 0.5\delta\omega_{c\text{дон}}$, $\delta\omega_{c\text{дон}}$, $(1 + 0.5K_0) \cdot \delta\omega_{c\text{дон}}$, $\delta\omega_{c\text{уд}}$, $1.5\delta\omega_{c\text{уд}}$.

Располагая фазовыми портретами, проследите, как ведут себя обе системы при скачке частоты той или иной величины.

Определенные сведения по методу фазовой плоскости, в том числе касающиеся непосредственно построения полных фазовых портретов следящей системы радиоавтоматики, определения характера стационарных точек и др., можно найти в учебнике [1].

Обратите внимание на то, что полученная Вами полоса удержания $\delta\omega_{c\ yd}$ в системе ЧАП намного превосходит длину линейного участка ее дискриминационной характеристики. Таким образом, предельно допустимая расстройка $\delta\omega_{c\ доп} = \Omega_{\max}$ и полоса удержания $\delta\omega_{c\ yd}$ – совершенно различные характеристики системы ЧАП, имеющие несовпадающие численные значения. Первая характеризует проявление динамического срыва слежения, то есть размыкание системы при скачке частоты на входе $\delta\omega_c$ на величину, превосходящую Ω_{\max} . Вторая характеризует квазистационарный срыв слежения, возникающий в рассматриваемой статической системе ЧАП первого порядка при постепенном («бесконечно медленном») уходе частоты входного сигнала.

2.6. Задание шестое

Определите остаточную расстройку (установившуюся ошибку) в нелинейных системах ЧАП и ФАП, находящихся в режиме равновесия, после отработки скачка частоты входного сигнала $\delta\omega_c = \delta\omega_{c\ доп}$. Для обеих систем постройте графики зависимости остаточной расстройки $\Omega_{уст}$, $\varphi_{уст}$ от начальной $\delta\omega_c$ при «бесконечно медленном» изменении ее величины.

При выполнении задания необходимо использовать дифференциальные уравнения систем, полученные в п. 2.4. Положив в них скорости изменения расстроек в системах $d\Omega/dt$ и $d\varphi/dt$ равными нулю, что соответствует

установившемся режиму равновесия систем, получите нелинейные уравнения, из которых определите рассогласование при равновесии $\Omega_{уст}$ и $\varphi_{уст}$.

Построение графика зависимости остаточной расстройки $\Omega_{уст}$ от величины меняющегося скачка $\delta\omega_c$ для системы ЧАП можно осуществить методом, изложенным в учебнике [1]. Однако проще оно осуществляется путем графического решения полученного выше нелинейного уравнения

$$\Omega + K_{\kappa} S_p F(\Omega) = \delta\omega_c. \quad (9)$$

Для этого достаточно построить кривую $f_1(\Omega) = F(\Omega)$, соответствующую СДХ ЧД, нанести на полученный график прямую $f_2(\Omega) = (\delta\omega_c - \Omega)/K_{\kappa} S_p$ и найти абсциссы точек их пересечения при различных по величине $\delta\omega_c$ (рис. 6). Функцию $F(\Omega)$ следует взять соответствующей принятой в п. 2.1 аппроксимации. Последовательность изменения $\delta\omega_c$ предполагается следующей: $0 \dots \Omega_{max} \dots 1.5 \cdot \delta\omega_{c\ yд}, 1.5 \cdot \delta\omega_{c\ yд} \dots \delta\omega_{c\ з} \dots 0$.

2.7. Задание седьмое

Сопоставьте рассмотренные Вами нелинейные следящие системы ЧАП и ФАП по полосе удержания, захвата и ошибкам отслеживания входного скачка частоты.

Задание выполняется по результатам, полученным Вами в предыдущих пунктах подготовительного задания. Комментарии и выводы обязательны.

3. Вопросы для проверки подготовленности к работе

3.1. Чем принципиально отличаются друг от друга структурные схемы систем ЧАП и ФАП: видом СДХ?

Порядком астатизма? Усилением контура на нулевой частоте? Размерностью коэффициента передачи?

3.2. Какой будет реакция нелинейных систем ЧАП и ФАП на скачок фазы входного сигнала, если этот скачок превышает и не превышает значение $\pi/2$?

3.3. Какие виды аппроксимирующих функций для СДХ частотного дискриминатора Вы встретили в учебнике при изучении курса?

3.4. Что называется фазовой траекторией системы? Чем отличаются фазовые портреты систем первого и второго порядка?

3.5. Как находятся точки равновесия системы и как определяется устойчивость движений системы в окрестностях этих точек?

3.6. Что такое динамический срыв слежения в нелинейной системе ЧАП, и чем он отличается от квазистационарного срыва?

3.7. Запишите дифференциальное уравнение системы ФАП по структурной схеме (рис. 3,б) относительно частотной расстройки $\Omega(t)$. Получите это же дифференциальное уравнение путем замены $d\varphi/dt = \Omega(t)$ из дифференциального уравнения ФАП относительно расстройки по фазе $\varphi(t)$.

3.8. Чем объясняется необходимость введения дифференцирующего звена в структурной схеме ФАП, представленной на рис. 3,а?

3.9. Что такое синхронный и асинхронный режимы работы системы ФАП? Как определить, в каком режиме работает система ФАП при заданном скачке (уходе) частоты $\delta\omega_c$?

3.10. Как соотносятся между собой частоты удержания и захвата в системах ЧАП и ФАП?

4. Лабораторные задания и указания по их выполнению

Работа в лаборатории (дисплейном классе) связана с моделированием процессов в исследуемых нелинейных системах на ЭВМ с использованием прикладной программы «L5».

Прикладная программа «L5» позволяет осуществить анализ систем ЧАП и ФАП первого порядка по их нелинейным моделям при разном характере задающих (входных) воздействий. При этом используется аппроксимации нелинейных СДХ дискриминаторов, принятые выше (см. п. 1.2). Моделирование осуществляется методом Эйлера. Анализ систем ЧАП и ФАП производится отдельно, выбор типа анализируемой нелинейной системы (ЧАП или ФАП) – соответствующей клавишей непосредственно после запуска программы.

При моделировании процессов в системе ЧАП первого порядка необходимо:

– посредством клавиши <1> установить заданное значение апертуры частотного дискриминатора $2\Omega_{\max} = 3N \text{ рад/с}$, где N – номер Вашего варианта;

– задать клавишей <2> коэффициент усиления системы $K_0 = 2N$;

– установить клавишей <3> постоянную времени инерционной звена системы $T = 0.1N \text{ с}$.

При моделировании процессов в системе ФАП первого порядка:

– посредством клавиши <1> выбрать необходимый для выполнения задания режим контроля: за изменением фазы (анализ $\varphi_c(t)$, $\varphi(t)$, $\varphi_z(t)$), за изменением частоты (анализ $\delta\omega_c(t)$, $\Omega(t)$, $\delta\omega_z(t)$);

– установить клавишей <2> добротность системы $K_0 = 2N \text{ рад/с}$.

Для обеих систем (ЧАП/ФАП первого порядка):

– на клавише <4>/<3> индицируется автоматически определяемый после задания K_0 и T/K_0 шаг дискретизации (моделирования) T_0 , с;

– параметры полиномиальной модели входного (задающего) воздействия $\lambda(t) = A \cdot t^M$ устанавливаются так: клавишей <5>/<4> – идентификатор M , определяющий характер воздействия, клавишей <6>/<5> – амплитудный параметр A ; необходимо учесть, что при моделировании системы ФАП в случае контроля за изменением фазы входное воздействие $\lambda(t)$ соответствует $\varphi_c(t) = \int \delta\omega_c(t) dt$, в противном случае – контроль за изменением частоты – $\lambda(t) = \delta\omega_c(t)$, поэтому параметры полиномиальной модели M и A следует задавать корректно;

– с помощью клавиши <7>/<6> вызывается подменю установки параметров результирующих графиков: интервал наблюдения по времени (оси абсцисс) t_Δ , максимальное и минимальное значение по оси ординат, количество расчетных точек – точек дискретизации n_0 ;

– для моделирования процессов в системе на интервале времени $[0, n_0 \cdot T_0]$ достаточно задействовать клавишу <8>/<7>;

– для продолжения моделирования процессов на последующих интервалах времени $[n_0 \cdot T_0, 2n_0 \cdot T_0]$, $[2n_0 \cdot T_0, 3n_0 \cdot T_0]$ и т. д. используется клавиша <9>/<8>;

– режим измерения координат графиков результирующих процессов включается клавишей <10>/<9> и позволяет посредством совмещения визирных линий с точками кривых моделирования определять необходимые характеристики протекающих в системах процессов.

4.1. Исследование явления динамического срыва в нелинейной системе ЧАП

При выполнении задания следует воспроизвести переходной процесс в нелинейной системе ЧАП (получить зависимости $\Omega(t)$ и $\delta\omega_c(t)$) на начальном интервале времени моделирования $[0, n_\delta \cdot T_\delta]$, задав $n_\delta = 15 \dots 30$, время наблюдения $t_\Delta = n_\delta \cdot T_\delta$. Значение входного скачка частоты $\delta\omega_c$ возьмите на 0.1 рад/с меньше допустимого скачка $\delta\omega_{c_дон}$, определенного Вами в п. 2.2 ($A = \delta\omega_{c_дон} - 0.1$, $M = 0$). Занесите графики переходного процесса в отчет. После этого вновь осуществите моделирование, введя параметр $A = \delta\omega_{c_дон} + 0.1$, что соответствует входному скачку частоты, превышающему на 0.1 рад/с величину допустимого. Нанесите вновь полученные кривые переходного процесса на построенный ранее график. Сопоставьте полученные кривые, сделайте вывод о возможности использования линейной модели при анализе выбранных воздействий на систему.

4.2. Исследование явления квазистационарного срыва слежения и захвата сигнала в нелинейной системе ЧАП.

Экспериментальное определение зависимости остаточной расстройки $\Omega_{уст}$ от начальной $\delta\omega_c$, полосы удержания $\delta\omega_{c_уд}$ и захвата $\delta\omega_{c_з}$ сигнала системой ЧАП

Задание следует выполнить методом моделирования малых скачкообразных воздействий. Существо метода заключается в следующем.

На нелинейную модель системы ЧАП подается скачок входного воздействия $\delta\omega_{c1} < \Omega_{max}$ и осуществляется моделирование системы на интервале времени $[0, n_\delta \cdot T_\delta]$ (рис.6,а – $[0, t_1]$), где $n_\delta = 15 \dots 30$ для обеспечения установившегося характера переходных процессов. По результирующим графикам

определяется установившаяся статическая ошибка $\Omega_{уст1}$ и на рисунок с графиком теоретической зависимости $\Omega_{уст} = \gamma(\delta\omega_c)$ (см. п. 2.6) наносится первая экспериментальная точка с координатами $(\delta\omega_{c1}, \Omega_{уст1})$.

Затем следует ввести новое значение входного воздействия $\delta\omega_{c2}$ (параметр воздействия – А), выбрав его из условия $\delta\omega_{c2} > \delta\omega_{c1}$, но так чтобы приращение $\Delta\omega_1 = \delta\omega_{c2} - \delta\omega_{c1}$ было меньше величины «остатка» линейного участка СДХ $\Omega_{max} - \Omega_{уст1}$. Добавку $\Delta\omega_1$ выбирают меньшей, чем величина $\Omega_{max} - \Omega_{уст1}$, чтобы не вызвать динамического срыва слежения в системе. Моделированием нового переходного процесса на интервале времени $[n_\delta \cdot T_\delta, 2n_\delta \cdot T_\delta]$ (рис.7,а – $[t_1, t_2]$), следует вновь определить новую остаточную расстройку $\Omega_{уст2}$, соответствующую начальному (внешнему) воздействию $\delta\omega_{c2}$. Нанеся на график точку с координатами $(\delta\omega_{c2}, \Omega_{уст2})$, следует перейти к третьему этапу моделирования, аналогичному по смыслу предыдущему.

Поэтапное квазистационарное увеличение $\delta\omega_c$ и $\Omega_{уст}$ поясняется на рис. 5,а и б. Его следует продолжать до тех пор, пока установившаяся ошибка $\Omega_{устi}$ не станет сопоставимой с Ω_{max} . Численное значение $\delta\omega_{ci}$ ступенчатого медленно нарастающего воздействия, при котором величина установившейся ошибки $\Omega_{устi}$ соответствует Ω_{max} , следует принять за экспериментально определенную полосу удержания $\delta\omega_{суд}$. При дальнейшем превышении $\delta\omega_{ci}$ полосы удержания $\delta\omega_{суд}$ наблюдается квазистационарный

срыв слежения в системе. Проанализируйте переходные процессы, происходящие в системе после срыва слежения.

Затем следует начать постепенное квазистационарное уменьшение входного воздействия от $\delta\omega_c > \delta\omega_{c\text{уд}}$ до $\delta\omega_c = 0$. Особенно внимательно следует относиться к моделированию при значениях $\delta\omega_{c_i} < \Omega_{\text{max}}$. Определите экспериментальную величину полосы захвата $\delta\omega_{c_3}$. В процессе выполнения этой части задания не забывайте наносить экспериментальные значения $\Omega_{\text{уст}i}$ на расчетный график $\Omega_{\text{уст}} = \gamma(\delta\omega_c)$ для соответствующих $\delta\omega_{c_i}$.

Проиллюстрируйте нелинейные явления квазистационарного срыва слежения и захвата сигнала нелинейной системой ЧАП, занеся в отчет результирующие кривые переходного процесса $\delta\omega_c(t)$, $\Omega(t)$, а также $\delta\omega_c(t)$.

Получившуюся экспериментальную зависимость $\Omega_{\text{уст}} = f(\delta\omega_c)$ следует сравнить с теоретической. Сделать выводы.

4.3. Исследование квазистационарного срыва слежения в нелинейной системе ЧАП при медленно меняющемся линейно нарастающем входном воздействии

При выполнении задания необходимо вместо серии малых постепенно нарастающих по амплитуде скачкообразных воздействий (см. п. 4.2), подать на вход системы медленно изменяющееся линейное воздействие $\delta\omega_c(t) = A \cdot t$. Поэтому в полиномиальной модели входного воздействия следует задать идентификатор характера воздействия M равным единице, а параметр A – скорость нарастания входной частоты – из условия $A \leq 0.1\Omega_{\text{max}}/t_y$, где t_y – время установления переходных процессов в системе. Поскольку время установления t_y однозначно связано с шагом

дискретизации T_δ , автоматически определяемым в программе и индицируемым на соответствующей клавише, рассчитать «пороговое» значение скорости нарастания частоты не представляет труда.

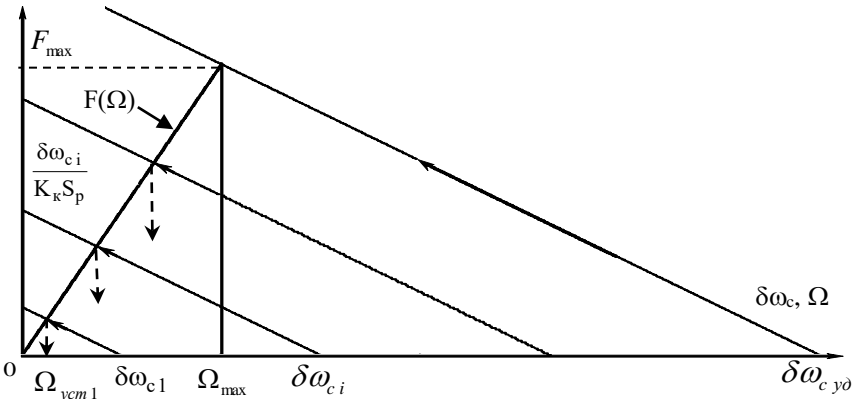
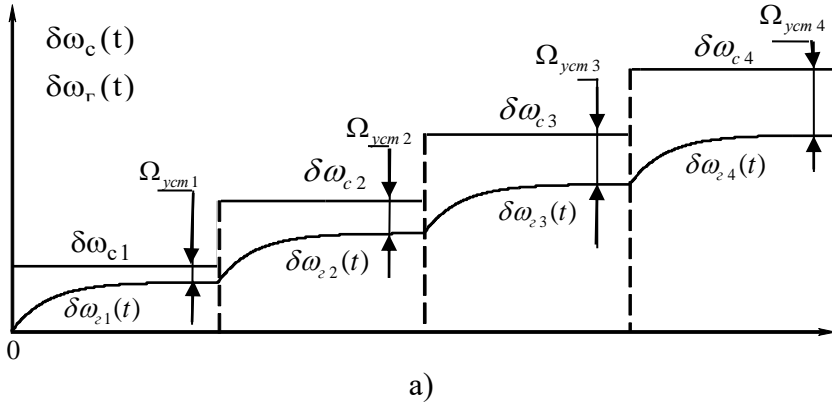


Рис. 7. Квазистационарное увеличение входного воздействия в нелинейной системе ЧАП: а) переходные процессы; б) графоаналитическое определение установившейся ошибки

Если при моделировании число точек дискретизации n_δ взять из расчета $A \cdot n_\delta \cdot T_\delta > \delta\omega_{c\ y\delta}$, опираясь на имеющиеся сведения о шаге T_δ и полосе удержания $\delta\omega_{c\ y\delta}$, найденной теоретически в п. 2.5, то исследуемое явление можно

пронаблюдать в пределах одного такта моделирования, задействовав клавишу <8> (интервал наблюдения по времени $t_{\Delta} = n_{\delta} \cdot T_{\delta}$).

По полученным в ходе моделирования кривым переходного процесса определите экспериментальную полосу удержания системы $\delta\omega_{c, y\delta}$, зависимость остаточной расстройки Ω от начальной $\delta\omega_c$ в установившемся режиме.

Для проверки правильности моделирования, повторите его, уменьшив скорость нарастания входной частоты в несколько раз. Если необходимо, то проведите моделирование многократно, добиваясь повторяемости результатов, то есть идентичности зависимостей $\Omega(\delta\omega_c)$.

Сравните полученные Вами результаты с расчетными и экспериментальными из предыдущего задания. Сделайте выводы.

Увеличьте в два раза исходный коэффициент усиления системы K_0 и вновь выполните задание. Сделайте вывод о характере зависимости $\delta\omega_{c, y\delta}$ от K_0 .

4.4. Исследование поведения системы ФАП первого порядка в нелинейном режиме

Воспроизведите переходный и установившийся процесс в системе при подаче на вход скачка частоты величиной $\delta\omega_c > \delta\omega_{c, \text{дон}}$, например, $\delta\omega_c = (1.5 \dots 2)\delta\omega_{c, \text{дон}}$. Численное значение $\delta\omega_{c, \text{дон}}$ определено Вами при выполнении п. 2.2.

При осуществлении контроля за изменением фаз входное воздействие должно иметь линейно нарастающий вид: $\varphi_c(t) = \delta\omega_c \cdot t$, в режиме контроля за изменением частот – ступенчатый характер: $\delta\omega_c(t) = \delta\omega_c \cdot 1(t)$. Помните об этом при введении параметров полиномиальной модели задающего воздействия.

Занесите в отчет кривые $\varphi_2(t)$, $\varphi(t)$, $\delta\omega_2(t)$, $\Omega(t)$, полученные при моделировании в переходном режиме. Прокомментируйте их, сделайте соответствующие выводы.

4.5. Определение методом моделирования полосы частот удержания $\delta\omega_{c_{y0}}$ и захвата $\delta\omega_{c_z}$ нелинейной системы ФАП

При выполнении задания следует изначально подать на модель системы входное воздействие $\varphi_c(t) = \delta\omega_c \cdot t$ (в режиме наблюдения частот – $\delta\omega_c(t) = \delta\omega_c \cdot 1(t)$), взяв $\delta\omega_c$ меньше рассчитанного $\delta\omega_{c_{дон}}$. Затем следует осуществить моделирование и убедиться, что $\Omega_{ycm} = 0$.

Далее необходимо увеличить $\delta\omega_c$ и вновь осуществить моделирование процессов в системе. Увеличение $\delta\omega_c$ следует продолжать до тех пор, пока не обнаружится колебательный характер изменения установившейся расстройки $\Omega_{ycm}(t)$. Определенное таким образом значение $\delta\omega_c$ будет характеризовать полосу удержания и захвата $\delta\omega_{c_{y0}} = \delta\omega_{c_z}$ системы ФАП, в чем следует убедиться, уменьшив параметр входного воздействия $\delta\omega_c$ и обнаружив исчезновение колебаний рассогласования $\Omega_{ycm}(t)$ и равенство его нулю.

Занесите значение $\delta\omega_{c_{y0}} = \delta\omega_{c_z}$ и соответствующую графическую интерпретацию срыва слежения и захвата сигнала системой в отчет. Сделайте выводы.

Увеличьте в два раза исходный коэффициент усиления K_0 системы ФАП и вновь полностью выполните задание. Сделайте вывод о характере зависимости $\delta\omega_{c_{y0}} = \delta\omega_{c_z}$ от коэффициента K_0 .

4.6. Исследование зависимости частоты модуляции перестраиваемого генератора (частоты биений входного сигнала с сигналом генератора) в асинхронном режиме ФАП от частоты $\delta\omega_c$ при $\delta\omega_c > \delta\omega_{c,y0}$

При выполнении задания следует подать на модель воздействие $\varphi_c(t) = \delta\omega_c \cdot t$ (в режиме наблюдения частот – $\delta\omega_c(t) = \delta\omega_c \cdot 1(t)$) с незначительным превышением $\delta\omega_c$ над $\delta\omega_{c,y0}$. Затем произведите моделирование процессов и, используя режим измерения координат графиков, определите экспериментальное значение периода колебаний расстройки $\Omega(t)$: $T_{ycm} = 2\pi / (\delta\omega_c - \delta\omega_{c,y0})$. Ясно, что такие измерения будут возможны только при $T_{ycm} \gg T_d$. Следите за соблюдением этого требования. Получите зависимость $T_{ycm} = \zeta(\delta\omega_c - \delta\omega_{c,y0})$, производя моделирование при постепенно увеличивающихся значениях $\delta\omega_c$. Приведите в отчете график этой зависимости.

Увеличьте в два раза исходный коэффициент усиления системы K_0 и вновь выполните задание. Нанесите новый график $T_{ycm}(\delta\omega_c - \delta\omega_{c,y0})$ на ранее полученный. Сравните их. Объясните, чем обусловлено различие.

В обоих случаях – при исходной величине K_0 и увеличенной вдвое – оцените диапазон изменения частотной расстройки и убедитесь, что он соответствует $2\Omega_{z,max}$.

5. Контрольные вопросы по проделанной работе

5.1. Изложите методику моделирования нелинейных следящих систем радиоавтоматики.

5.2. Изложите и обоснуйте методику определения полосы захвата и удержания с помощью моделирования нелинейной системы на ЭВМ.

5.3. Чем объясняется различие частот захвата и удержания в системе ЧАП и в системе ФАП?

5.4. Сопоставьте фазовые портреты систем ЧАП и ФАП при воздействии скачка частоты входного сигнала.

5.5. Можно ли посредством используемой в работе модели исследовать асинхронный режим работы ФАП?

5.6. Каково влияние фильтров на полосу захвата в системах ФАП?

5.7. В чем различие во влиянии пропорционально-интегрирующего и инерционного звеньев на процесс захвата в системе ФАП?

5.8. Докажите, что параметр Ω_{\max} в формуле Релея для СДХ частотного дискриминатора равен абсциссе точки максимума кривой, описываемой этой формулой.

5.9. Докажите, что максимальное напряжение на выходе частотного дискриминатора с СДХ, описываемой кривой Релея, равно $F_{\max} = S_{\delta} \Omega_{\max} / \sqrt{e}$.

5.10. Что такое динамический и квазистационарный срыв слежения в нелинейной системе ЧАП?

5.11. Объясните причины расхождения результатов расчетов и моделирования исследованных Вами зависимостей остаточной расстройки от ухода частоты входного сигнала в нелинейных системах ЧАП и ФАП.

5.12. По каким признакам визуально можно определить момент срыва синхронизма в системе ФАП? Можно ли по этим признакам установить срыв слежения в системе ЧАП?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов А.И. Радиоавтоматика [Текст]: учеб. пособие / А.И. Соколов, Ю.С. Юрченко. - М.: Academia, 2010. - 272 с.

2. Перов А.И. Радиоавтоматика [Текст]: учеб. пособие / А.И. Перов, В.Н. Замолотчиков, В.М. Чиликин. - М.: Радиотехника, 2014. - 320 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие указания	1
1.1. Цель работы	1
1.2. Исследуемые системы и явления	2
2. Подготовительные задания и указания по их выполнению	9
2.1. Задание первое	9
2.2. Задание второе	10
2.3. Задание третье	11
2.4. Задание четвертое	14
2.5. Задание пятое	16
2.6. Задание шестое	17
2.7. Задание седьмое	18
3. Вопросы для проверки подготовленности к работе	18
4. Лабораторные задания и указания по их выполнению	19
4.1. Исследование явления динамического срыва в нелинейной системе ЧАП	21
4.2. Исследование явления квазистационарного срыва слежения и захвата сигнала в нелинейной системе ЧАП	22
4.3. Исследование квазистационарного срыва слежения в нелинейной системе ЧАП при медленно меняющемся линейно нарастающем входном воздействии	24
4.4. Исследование поведения системы ФАП первого порядка в нелинейном режиме	26
5. Контрольные вопросы по проделанной работе	28
Библиографический список	29

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ РАДИОАВТОМАТИКИ
ПО ИХ НЕЛИНЕЙНЫМ МОДЕЛЯМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторной работе № 5 по дисциплине
«Радиоавтоматика»
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
и направления 11.03.01 «Радиотехника»

Составитель: Володько Александр Владиславович

Компьютерный набор А.В. Володько.

Подписано к изданию 15.06.2019
Уч. изд.л. 1,9

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14.