



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Автоматизация и математическое моделирование в НГК»

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В
НЕФТЕГАЗОВОМ КОМПЛЕКСЕ**

Методическое пособие к
курсовой работе
для студентов заочной формы обучения

Ростов–на–Дону
ДГТУ
2024

Выполненная контрольная работа оформляется в виде пояснительной записки с необходимыми расчетами, скриншотами, блок-схемами и пояснениями.

Вариант задания выбирается в соответствии с номером студента в списке учебной группы, например:

студент под №1 получит вариант 1;

студент под №2 получит вариант 2;

студент под №3 получит вариант 3;

студент под №4 получит вариант 4

и т.д.

Работа, не соответствующая варианту задания, выполненная не в полном объеме или небрежно, возвращается студенту на доработку. Отчет не следует перегружать излишними подробностями, однако все важные стороны задания должны быть освещены достаточно подробно. Текст и решения должны быть изложены техническим языком и допускать только однозначное толкование.

1. ЗАДАНИЕ

1. Найти амплитуды A и частоты ω периодических режимов при различных значениях варьируемого параметра заданной нелинейной системы автоматического управления (САУ) двумя способами: приближенным графоаналитическим и уточненным численным с помощью персонального компьютера (ПК).

2. Исследовать устойчивость найденных периодических режимов.

3. Найти граничное значение варьируемого параметра, при котором колебания в системе находятся на границе своего возникновения и исчезновения. Построить зависимости параметров A и ω периодических режимов от значений варьируемого параметра.

4. Получить на ПК, например с помощью пакета прикладных программ (ППП) Simulink, временные диаграммы переходных процессов изменения входной величины нелинейного элемента (НЭ), построить проекции соответствующих фазовых траекторий исследуемой системы при нескольких значениях варьируемого параметра и сделать выводы о ее динамике. Сравнить параметры полученного режима с рассчитанными в п.1.

2. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

2.1. Система автоматического регулирования с нелинейностью типа насыщение

Структурная схема системы автоматического регулирования (САР) и статическая характеристика ее нелинейного звена представлены соответственно на рис. 2.1 и рис. 2.2.

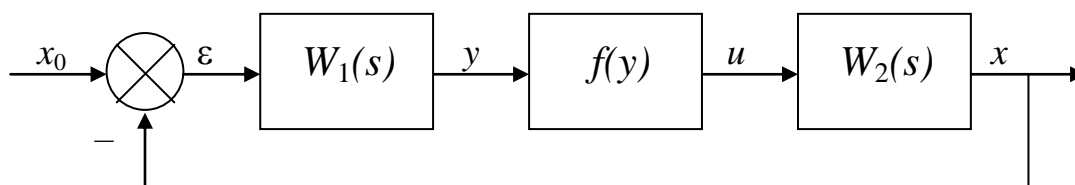


Рис. 2.1

Передаточные функции линейных звеньев и комплексный коэффициент передачи гармонически линеаризованного нелинейного звена имеют следующий вид:

$$W_1(s) = \frac{K_1(T_1s + 1)}{T_5s + 1}; \quad W_2(s) = \frac{K_2}{s^r(T_2s + 1)(T_3s + 1)(T_4s + m)};$$

$$W_{HЭ}(A) = \frac{2 \cdot c}{\pi \cdot a} \left(\arcsin \frac{a}{A} + \frac{a}{A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}} \right), \quad A \geq a,$$

а численные значения параметров звеньев системы приведены в табл. 2.1.

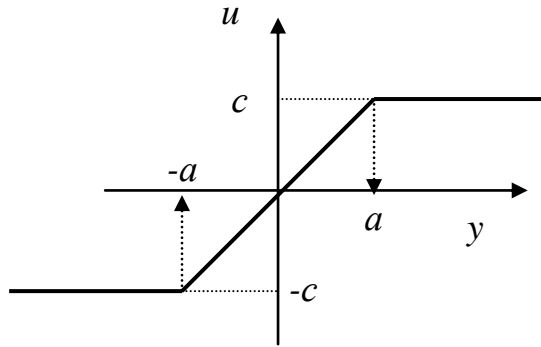


Рис. 2.2

Варьируемым параметром системы является постоянная времени T_1 , которая может принимать три значения $T_1 = \{0; T_1'; T_1''\}$.

Таблица 2.1

Вариант	Параметры										
	a	c	K_1	T_1'/T_1''	K_2	T_2	T_3	T_4	m	r	T_5
0	1	25	0,2	0,2/0,4	100	0,5	0,9	1,0	0	0	0
1	2	50	0,1	0,04/0,08	80	0,1	0,2	0,3	1	0	0
2	1	20	0,2	0,05/0,1	90	0,2	0,5	1,0	0	0	0
3	2	40	0,3	0,06/0,1	150	0,4	0,6	0,7	1	0	0
4	1	10	0,5	0,04/0,06	100	0,3	0,4	0,2	1	0	0
5	2	16	0,2	0,25/0,50	80	1,0	1,8	1,0	0	0	0
6	2	20	0,3	0,5/0,7	60	1,5	2,5	1,0	0	0	0
7	1	30	0,1	0,01/0,02	120	0,8	0,6	0,4	1	0	0
8	1	15	0,15	0,04/0,07	100	1,2	0,6	0,8	1	0	0
9	2	30	0,2	0,1/0,3	120	1,2	2,2	1,6	1	0	0
10	1	25	0,2	0,2/0,4	100	0,5	0,9	1,0	1	1	0,1
11	2	50	0,1	0,04/0,08	80	0,1	0,2	0,3	1	1	0,1
12	1	20	0,2	0,05/0,1	90	0,2	0,5	1,0	1	1	0,1
13	2	40	0,3	0,06/0,1	150	0,4	0,6	0,7	1	1	0,1
14	1	10	0,5	0,04/0,06	100	0,3	0,4	0,2	1	1	0,1
15	2	16	0,2	0,25/0,50	80	1,0	1,8	1,0	1	1	0,1
16	2	20	0,3	0,5/0,7	60	1,5	2,5	1,0	1	1	0,1
17	1	30	0,1	0,01/0,02	122	0,8	0,6	0,4	1	0	0,1
18	1	15	0,15	0,04/0,07	123	1,5	0,6	0,8	1	1	0,1
19	2	14	0,2	0,1/0,3	124	1,0	2,2	1,4	0	1	0,1
20	1	13	0,1	0,01/0,02	115	0,8	0,6	0,1	1	1	0
21	1	15	0,15	0,04/0,07	112	1,1	0,6	0,2	0	0	0
22	2	12	0,2	0,1/0,3	121	1,2	2,2	1,3	0	0	0
23	2	11	0,15	0,1/0,3	125	1,3	2,2	1,1	1	0	0

3. УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЯ

3.1. Приближенный графоаналитический расчет параметров периодических режимов и исследование их устойчивости

При графоаналитическом расчете указанных параметров исходную структурную схему заданной нелинейной системы необходимо преобразовать к расчетной (рис. 3.1), состоящей из последовательно соединенных нелинейного элемента НЭ и преобразованной в единый блок линейной части ЛЧ. При этом сигнал задания x_0 полагается равным нулю, т.к. расчет осуществляется для симметричных автоколебаний.

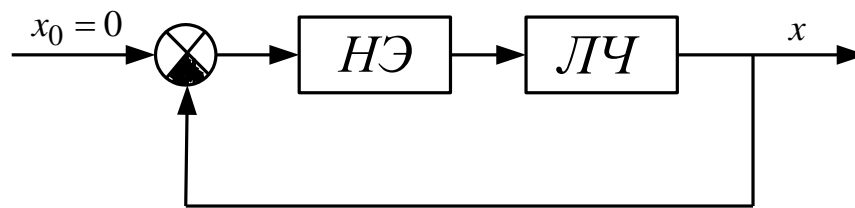


Рис. 3.1

Условием возникновения периодических режимов в представленной на рис. 3.1 нелинейной системе является основное уравнение метода гармонической линеаризации

$$1 + W_{ЛЧ}(j\omega) \cdot W_{НЭ}(A) = 0, \quad (3.1)$$

где $W_{ЛЧ}(j\omega)$ – частотная передаточная функция ЛЧ; $W_{НЭ}(A)$ – комплексный коэффициент передачи гармонически линеаризованного НЭ,

$$W_{НЭ}(A) = q(A) + jq'(A),$$

Причем коэффициенты гармонической линеаризации $q(A)$ и $q'(A)$ можно найти для любой типовой нелинейности в соответствующей литературе, в частности в сборнике задач [2].

Графическое решение уравнения (3.1) соответствует точкам пересечения кривых $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и $Z_{НЭ}(A) = -1/W_{НЭ}(A)$, рис. 3.2, по которым из кривой $W_{ЛЧ}(j\omega)$ можно определить частоты ω_i возможных периодических режимов, а их амплитуды A_i определяют из кривой $Z_{НЭ}(A)$.

Расчет и построение характеристик нелинейного элемента и линейной части системы можно осуществить с помощью математического пакета Mathcad [3] на персональном компьютере. Однако для этого необходимо правильно выбрать необходимый диапазон изменения частоты ω для расчета характеристики $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и амплитуды A для расчета характеристики $Z_{НЭ}(A)$. При этом можно принять во внимание следующее.

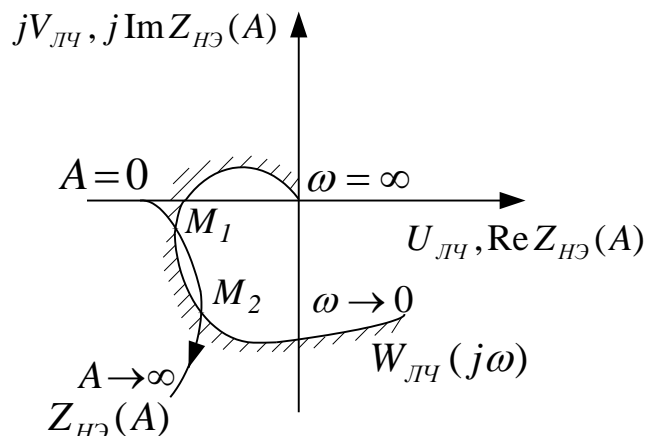


Рис. 3.2

1. Диапазоны изменения амплитуд A указаны в каждом варианте так, чтобы нелинейность себя проявляла.

2. У однозначных нелинейностей коэффициент передачи является величиной вещественной, поэтому характеристика $Z_{HЭ}(A)$ проходит по отрицательной вещественной полуоси. Причем у некоторых из них этот коэффициент имеет экстремум (например, при $A=a\sqrt{2}$ у трехпозиционного реле), вследствие чего характеристика $Z_{HЭ}(A)$ состоит из двух ветвей, идущих навстречу друг другу, что следует отразить условно на графике в виде двух бесконечно близких отрезков прямых.

3. Частота ω периодического режима для всех однозначных нелинейностей (варианты 2.1, 2.3, 2.6.2, 2.6.3) совпадает с частотой ω_π , для которой $V_{ЛЧ}(\omega_\pi)=0$.

4. У нелинейностей с гистерезисом характеристики $Z_{HЭ}(A)$ располагаются в третьем квадранте комплексной плоскости, а у нелинейности типа “упор” – во втором. Поэтому и частоту ω при построении $W_{ЛЧ}(j\omega)$ для поиска периодических решений следует изменять в таком диапазоне, чтобы АФХ ЛЧ располагалась в том же квадранте, если это возможно при заданном значении варьируемого параметра.

Расчет и построение характеристик $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и $Z_{HЭ}(A)$ производятся в следующем порядке.

1. В командном окне Matcad с помощью кнопки “ $m..n$ ” на панели инструментов “Matrix” переменной i присваивают (нажатием клавиши “Ctrl”) последовательность целых чисел от $m=0$ до $n=k$, где число k на единицу меньше, чем планируемое число дискретных значений частоты ω и амплитуды A , например $k=5$. С помощью введенной переменной i формируют компоненты w_i и A_i векторов w и A .

2. Ниже на том же поле вводят расчетные формулы для характеристик $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и $Z_{HЭ}(A)$, а под ними – функции выделения вещественной и мнимой части расчетных формул.

3. С помощью кнопки “Graph” в меню инструментов “Insert” выводят на экран дисплея графическое окно с декартовыми координатными осями.

4. Выводят на экран дисплея значения компонентов всех векторов, необходимых и достаточных для построения и обработки характеристик $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и $Z_{НЭ}(A)$, т.е. w , A , $Re(W)$, $Im(W)$, $Re(Z)$, $Im(Z)$. Это необходимо для того, чтобы на характеристиках $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и $Z_{НЭ}(A)$ отметить достаточное число точек с оцифрованными значениями соответствующих параметров ω и A .

5. В позициях обозначений координатных осей вводят через запятую соответствующие обозначения проекций векторов $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и $Z_{НЭ}(A)$. И щелкнув “ЛКМ” в любой части экрана, получают графики искомых частей характеристик $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и $Z_{НЭ}(A)$.

Для примера в приложении 1 представлен протокол расчета и построения характеристик $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и $Z_{НЭ}(A)$ для САР с нелинейностью типа двухпозиционное реле с гистерезисом, значения параметров которой были выбраны следующие: $T_1=0.1$, $T_{21}=1$, $T_{22}=0.1$, $T_3=0$, $k_1=2$, $k_2=15$, $k_3=0$, $a=1$, $c=20$.

Из рис.П.1, на котором через w обозначена частота ω , видно, что кривые $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и $Z_{НЭ}(A)$ имеют одну точку пересечения. Это означает, что в рассматриваемой САР возможен один периодический режим. Причем частота и амплитуда колебаний входного сигнала НЭ имеют следующие приближенные значения: $\omega \approx 17$, $A \approx 1,1$.

Анализ устойчивости найденных периодических режимов в точках пересечения кривых $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и $Z_{НЭ}(A)$, рис. 3.2, осуществляется по взаимному расположению этих кривых. Рассматривая $Z_{НЭ}(A)$ как параметр D -разбиения из уравнения (3.1), можно установить, что границей D -разбиения при этом является кривая $W_{ЛЧ}(j\omega)$. Нанеся на эту границу штриховку по известному правилу (слева по ходу при возрастании ω), выделяют область устойчивости (с заштрихованной стороны характеристики ЛЧ системы). Тогда для анализа устойчивости найденных решений применимо следующее правило.

Периодический режим устойчив, если, двигаясь по характеристике НЭ в сторону возрастания амплитуды A , переходим из неустойчивой в устойчивую область D -разбиения и наоборот. Таким образом, в точке M_1 (см. рис. 3.2) периодический режим неустойчив, а в точке M_2 – устойчив, т.е. соответствует автоколебаниям с найденными амплитудой A и частотой ω . Неустойчивый режим работы физически существовать не может, но для практики он важен тем, что определяет в фазовом пространстве системы границу сходящихся и расходящихся процессов, называемую сепаратрисой.

Заметим, что если кривые $Z_{НЭ}(A)$ и $W_{ЛЧ}(j\omega)$ вообще не пересекаются, то решения уравнения (3.1) не существует, и автоколебания в заданной нелинейной системе невозможны. Если же указанные кривые имеют точку касания, то автоколебания в этой точке находятся на грани своего возникновения и исчезновения.

Исследование устойчивости периодических режимов может быть осуществлено также и аналитически по выполнению следующего неравенства:

$$\frac{\partial X(\omega, A)}{\partial A} \cdot \frac{\partial Y(\omega, A)}{\partial \omega} - \frac{\partial Y(\omega, A)}{\partial A} \cdot \frac{\partial X(\omega, A)}{\partial \omega} > 0, \quad (3.2)$$

где $X(\omega, A)$ и $Y(\omega, A)$ – соответственно вещественная и мнимая части уравнения (3.1), записанного в форме

$$X(\omega, A) + jY(\omega, A) = 0,$$

а производные вычисляются в точках пересечения.

Для рассмотренного в приложении 1 примера периодический режим в точке пересечения кривых на рис. П.1 устойчив, т.е. соответствует автоколебаниям с найденными значениями амплитуды и частоты.

3.2. Уточненный численный расчет параметров периодических режимов

Уравнение (3.1) является комплексным, поэтому его можно представить системой двух уравнений с двумя неизвестными: A и ω , т.е.

$$\left. \begin{aligned} X(\omega, A) &= 0; \\ Y(\omega, A) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

где приняты те же обозначения, что и в выражении (3.2).

Решение системы уравнений (3.3) может быть найдено с помощью того же математического пакета Mathcad на ПК со стартовыми значениями амплитуды A и частоты ω , полученными в п.3.1.

В качестве примера в Приложении 2 приведен протокол расчета параметров A и ω периодического режима в САУ с нелинейностью типа люфт путем решения соответствующей системы нелинейных алгебраических уравнений. При этом через q_1 и q_2 обозначены коэффициенты гармонической линеаризации $q(A)$ и $q'(A)$, через ω – частота, через β – параметр.

Замечание. Для решения системы нелинейных алгебраических уравнений в пакете Mathcad применяется специальный вычислительный блок, состоящий из трех частей:

- 1) Given – ключевое слово;
- 2) система уравнений, записанная логическими операторами;
- 3) Find(x_1, \dots, x_m) – встроенная функция для решения системы уравнений относительно переменных x_1, \dots, x_m .

Блок Given/Find использует для поиска решения итерационные методы. Поэтому требуется обязательно задавать начальные значения для всех переменных x_1, \dots, x_m . Это осуществляется нажатием клавиши “Ctrl”. Знак равенства в уравнениях ставится сочетанием клавиш “Ctrl”+“=”, кон-

станта π вводится сочетанием клавиш “Shift”+“Ctrl”+”p”, а запуск решения осуществляется нажатием клавиши “=”.

3.3. Расчет граничного значения коэффициента усиления

Граничным называется минимальное значение коэффициента усиления K линейной части (ЛЧ) САУ, при котором автоколебания находятся на границе своего возникновения и исчезновения. При граничном значении коэффициента усиления характеристики ЛЧ и НЭ системы автоматического управления имеют одну общую точку соприкосновения или касания. На рис. 3.3 показаны различные случаи расположения указанных характеристик для систем с нелинейностями следующих типов: а) насыщение; б) двухпозиционное реле; в) трехпозиционное реле без гистерезиса; г) люфт.

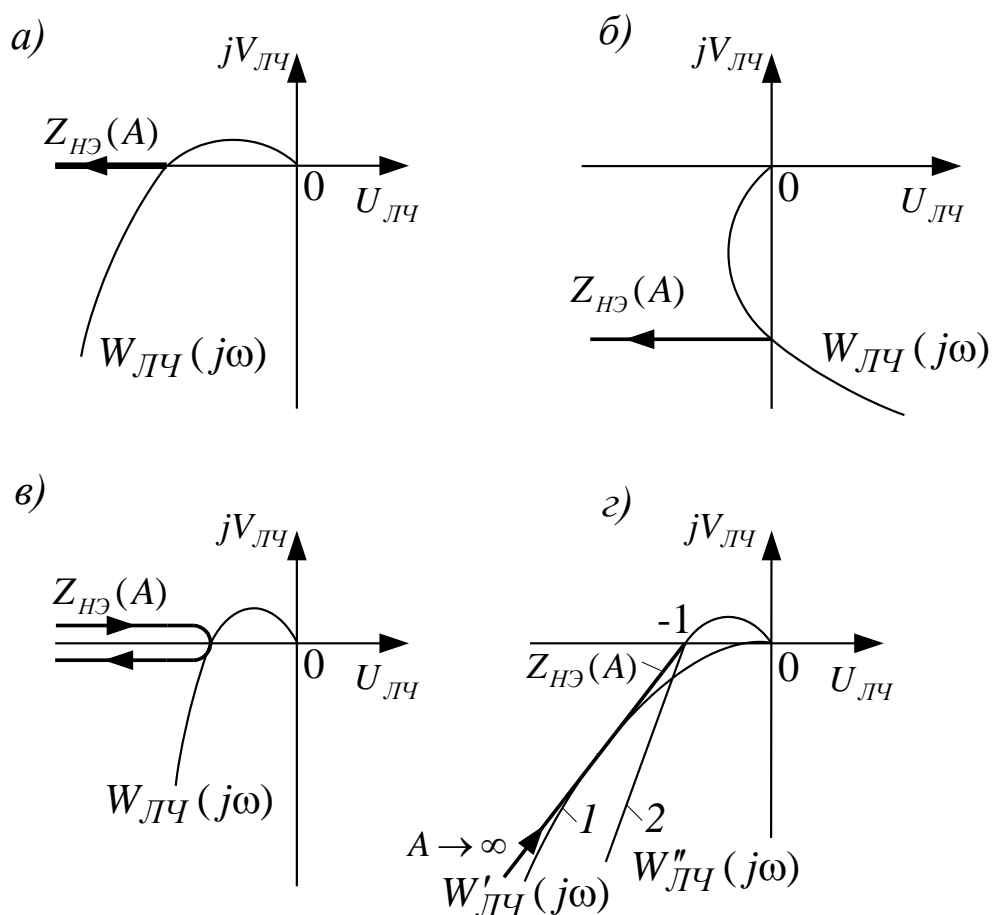


Рис. 3.3

Заметим, что в точке касания, в отличие от точки соприкосновения, кривые $Z_{HЭ}(A)$ и $W_{ЛЧ}(j\omega)$ имеют общую касательную. Этот случай возможен, в частности, для САУ с нелинейностью типа люфт.

Вычисление граничного значения K упрощается, если точка соприкосновения принадлежит одной из осей координат комплексной плоскости, на которой строятся кривые $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и $Z_{HЭ}(A)$ (рис. 3.3, а – в). В этом случае сначала находят соответствующее значение частоты ω автоколеба-

ний приравниванием к нулю мнимой (или вещественной) части частотной передаточной функции $W_{ЛЧ}(j\omega)$.

Затем находят значение $Z_{НЭ}(A)$ в точке соприкосновения. При этом точке соприкосновения для САУ, имеющей двухпозиционное реле с гистерезисом или нелинейность типа насыщение, соответствует минимальное значение амплитуды автоколебаний $A=a$. Для системы с идеальным двухпозиционным реле ($a=0$) получается $\omega \rightarrow \infty$ и $A=0$. Для системы с трехпозиционным реле необходимо исследовать на экстремум функцию $W_{НЭ}(A)$ и при найденном значении амплитуды A найти минимальное по модулю значение $Z_{НЭ}(A)$.

Наконец, из основного расчетного уравнения (3.1) метода гармонического баланса при найденных значениях частоты ω и амплитуды A можно определить искомое граничное значение K для случая соприкосновения характеристик ЛЧ и НЭ.

Заметим, что для САУ с нелинейностью типа насыщение граничное значение K может быть найдено так же, как линейной системы: по любому известному критерию устойчивости при работе НЭ на линейном участке.

Граничное значение коэффициента усиления K для САУ с нелинейностью типа люфт может быть найдено путем совместного решения уравнения (3.1) и уравнения, выражающего условие наличия у характеристик ЛЧ и НЭ общей касательной, т.е.

$$\frac{\partial V_{ЛО}(\omega)}{\partial U_{ЛО}(\omega)} = \frac{\partial q'(A)}{\partial q(A)}, \quad (3.4)$$

где $U_{ЛО}(\omega), V_{ЛО}(\omega)$ – соответственно вещественная и мнимая части обратной частотной передаточной функции ЛЧ, т.е.

$$-W_{ЛЧ}^{-1}(j\omega) = U_{ЛО}(\omega) + jV_{ЛО}(\omega). \quad (3.5)$$

При этом входящие в уравнение (3.5) производные можно найти по формуле для неявной параметрически заданной функции, т.е.

$$\frac{\partial V_{ЛО}(\omega)}{\partial U_{ЛО}(\omega)} = \frac{\partial V_{ЛО}(\omega)}{\partial \omega} : \frac{\partial U_{ЛО}(\omega)}{\partial \omega}; \quad \frac{\partial q'(A)}{\partial q(A)} = \frac{\partial q'(A)}{\partial \beta} : \frac{\partial q(A)}{\partial \beta}, \quad (3.6)$$

где $\beta = \arcsin(2a/A - 1)$.

Заметим также, что уравнение (3.5) может быть получено точно в таком же виде из неравенства (3.2), выражающего условие устойчивости периодического режима, если в нем заменить знак неравенства на знак равенства.

После нахождения производных (3.6) и подстановки найденных для них выражений в уравнение (3.5), в частности для рассматриваемой в п. 2.4 САУ, оно приобретает следующий вид:

$$\frac{3T_1T_2\omega^2 - 1}{2(T_1 + T_2)\omega} = \operatorname{tg}\beta. \quad (3.7)$$

Совместное решение уравнений (3.1) и (3.7) может быть найдено на ПК с помощью того же математического пакета Mathcad. При этом в результате решения указанных уравнений будут определены амплитуда A , частота ω и граничное значение коэффициента K усиления ЛЧ, соответствующие точке касания характеристик ЛЧ и НЭ.

Если же система уравнений (3.1) и (3.7) не имеет решения, то это означает, что точки касания характеристик ЛЧ и НЭ при заданных значениях параметров САУ быть не может, но возможно существование точки их соприкосновения (кривая 2 на рис. 3.3, г). При этом амплитуда $A = \infty$, частота $\omega = \omega_{\pi}$, а граничное значение коэффициента усиления ЛЧ можно найти из основного расчетного уравнения (3.1). В этом случае предельный цикл (см. рис. 3.3, г) становится бесконечно большим, так как амплитуда $A = \infty$. Особая точка в начале координат при этом приобретает устойчивость «в целом» вместо устойчивости «в большом».

Листинг исходных данных для ввода в ПК и расчета на нем граничного значения коэффициента усиления ЛЧ, а также соответствующих ему параметров A и ω , например, в той же САУ с нелинейностью типа люфт, отличается от представленного в Протоколе расчета параметров автоколебаний приложения 2 только тем, что вместо равенства $K=10$ вводится дополнительное уравнение (3.7).

3.4. Построение проекций фазовых портретов

Ввиду того что порядок уравнений исследуемых систем больше двух, построение их фазовых портретов в точном виде затруднительно.

Однако при расчете на ПК переходных процессов можно одновременно построить проекции фазовых траекторий на фазовую плоскость ($X_1, X_2 = \dot{X}_1$), обозначение горизонтальной оси которой совпадает с обозначением входной величины X_1 НЭ, и объяснить их характер.

На рис. 3.4 показаны возможные разновидности таких траекторий:

- а) с одним устойчивым предельным циклом, что соответствует мягкому режиму самовозбуждения автоколебаний;
- б) с одним неустойчивым предельным циклом;
- в) с устойчивым и неустойчивым предельными циклами;
- г) с полуустойчивым предельным циклом, характерным для САУ с граничным значением коэффициента усиления ЛЧ.

Кроме того, при значении коэффициента усиления ЛЧ, меньшем его граничного значения, может быть сходящийся характер всех фазовых траекторий. При этом у систем автоматического управления, имеющих нелинейность с зоной нечувствительности или неоднозначности, фазовые траектории могут исходить (сходиться) из особых точек, принадлежащих отрезку вещественной оси $|X_1| \leq a$.

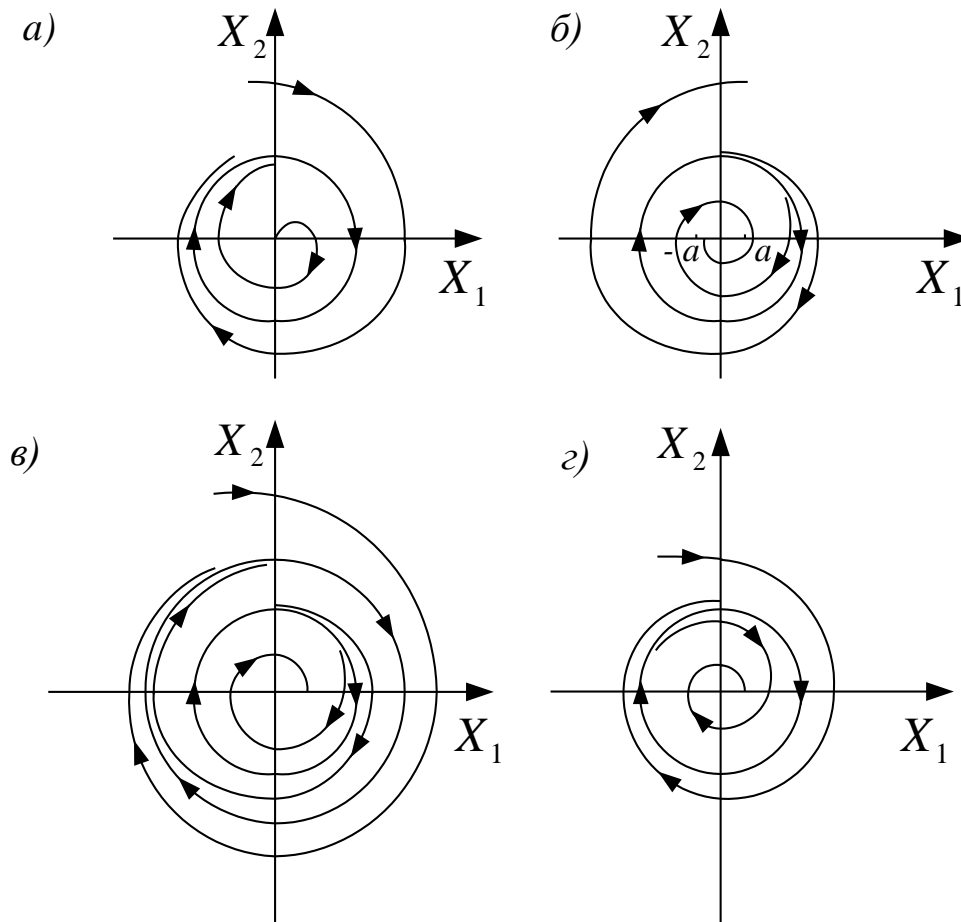


Рис. 3.4

Если при заданном диапазоне изменения варьируемого параметра возможны разнохарактерные фазовые портреты, то все они должны быть построены, а в выводах по курсовой работе необходимо дать анализ изменения динамических свойств исследуемой САУ.

3.5. Моделирование нелинейной системы и получение временной диаграммы её переходного процесса на ПК

Моделирование заданной нелинейной системы можно производить с помощью различных пакетов прикладных программ, например ППП Simulink [4, 5]. В этом пакете применяется структурный метод моделирования, когда каждое звено САУ моделируется соответствующим функциональным блоком.

Ввод в ЭВМ структуры и параметров схемы моделирования и получение временной диаграммы изменения входной величины X_1 НЭ исследуемой системы производится в диалоговом режиме. Поэтому необходимо заранее подготовить ответы на вопросы ЭВМ о времени наблюдения процесса (времени интегрирования), начальном шаге интегрирования, интервале вывода и номер блока для вывода на печать. При поиске ответов на указанные вопросы можно ориентироваться на результаты расчета пара-

метров периодических режимов (см. п.3.1 и п.3.2). В частности, если параметры автоколебаний A и ω известны, то тогда можно выбрать, в частности, время наблюдения процесса: $T = (8 \div 10)\pi / \omega$;

Кроме того, при вводе в ПК параметров и начальных условий следует задавать начальное значение величины X_I в окрестности значения амплитуды A исследуемого периодического режима и с учетом соответствующего фазового портрета системы.

При цифровом моделировании НЭ с характеристиками типа “упор” и “люфт” можно использовать схемы моделей, которые представлены соответственно на рис. 3.5 и 3.6.

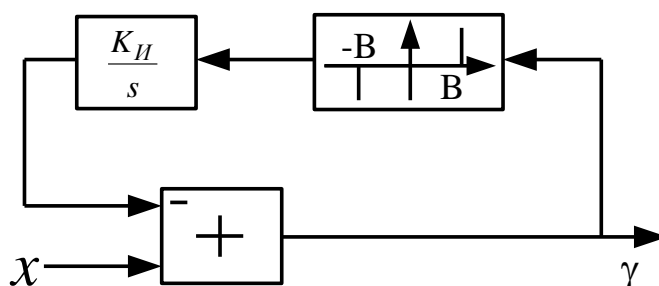


Рис. 3.5

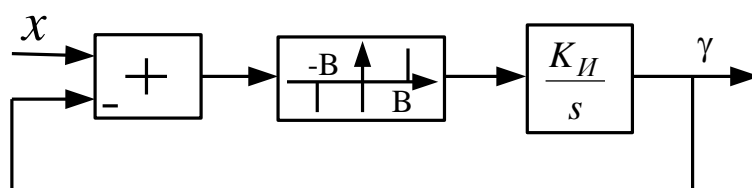


Рис. 3.6

В этих схемах K_I и крутизну характеристики «зона нечувствительности» устремить к бесконечности.

При цифровом моделировании НЭ с характеристиками типа “зона нечувствительности с ограничением” и “линейно-релейная характеристика” можно использовать схемы моделей, которые представлены соответственно на рис. 3.7 и 3.8.

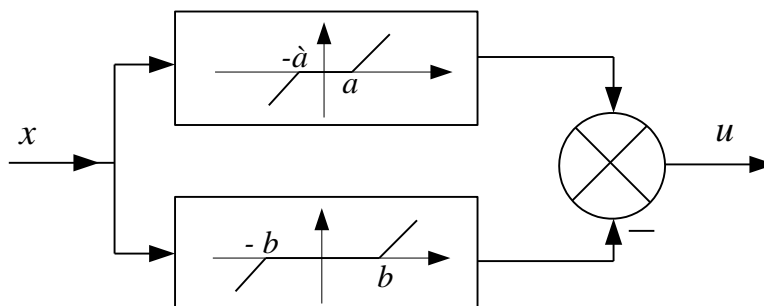


Рис. 3.7

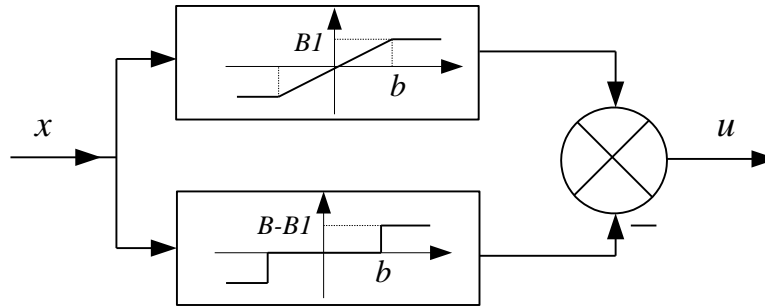


Рис. 3.8

При моделировании следует учитывать следующее.

1. Типовые нелинейности с ограничением имеют уровень насыщения, равный единице. Поэтому последовательно с ними надо включать усилитель, коэффициент усиления которого равен заданному уровню ограничения.

2. При моделировании систем исследуется их свободное движение, причем начальные условия задаются на интеграторе, подключенном ко входу НЭ. Если же ко входу НЭ подключено инерционное звено, то его представляют в виде интегратора с жесткой отрицательной обратной связью.

3. На горизонтальную ось регистратора XY-Graph при снятии фазовых траекторий подается сигнал X_1 , а на вертикальную ось – производная этого сигнала.

Протокол расчета характеристик

$$i := 0..4 \quad w_i := 9.5 + .25 \cdot i \quad A_i := 90 + 5 \cdot i$$

$$W := \frac{70}{\left[1 + i \cdot w + .1 \cdot (iw)^2 + .01 \cdot (i \cdot w)^3 \right]}$$

$$w = \begin{pmatrix} 9.5 \\ 9.75 \\ 10 \\ 10.25 \\ 10.5 \end{pmatrix} \quad \operatorname{Re}(W) = \begin{pmatrix} -8.608 \\ -8.203 \\ -7.778 \\ -7.342 \\ -6.903 \end{pmatrix}$$

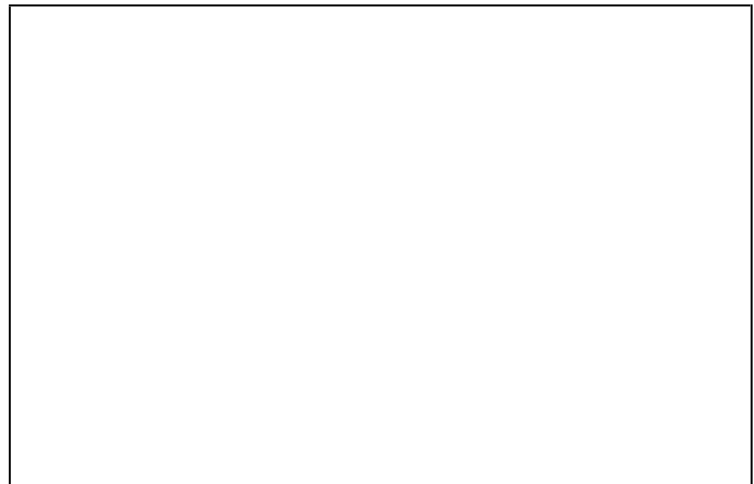
$$z := \frac{-\pi}{40} \cdot \sqrt{A^2 - 1} - i \frac{\pi}{40}$$

$$\operatorname{Im}(W) = \begin{pmatrix} -0.994 \\ -0.464 \\ 0 \\ 0.401 \\ 0.741 \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} 90 \\ 95 \\ 100 \\ 105 \\ 110 \end{pmatrix} \quad \operatorname{Re}(z) = \begin{pmatrix} -7.068 \\ -7.461 \\ -7.854 \\ -8.246 \\ -8.639 \end{pmatrix} \quad \operatorname{Im}(z) = \begin{pmatrix} -0.079 \\ -0.079 \\ -0.079 \\ -0.079 \\ -0.079 \end{pmatrix}$$

$\operatorname{Im}(z)$

$\operatorname{Im}(W)$



$\operatorname{Re}(z), \operatorname{Re}(W)$

Рис. П.1

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Протокол расчета параметров автоколебаний

$$\begin{array}{llll}
 A := 1 & q1 := .01 & b := 1 & T1 := .3 \\
 & & & k := 10 \\
 w := .5 & q2 := -.1 & a := .5 & T2 := .2
 \end{array}$$

Given

$$-(T1 + T2) w^2 + k \cdot q1 = 0 \quad q1 = .5 - \left(\frac{b}{\pi} \right) - \frac{\sin(2 \cdot b)}{2 \cdot \pi}$$

$$-T1 \cdot T2 \cdot w^3 + w + k \cdot q2 = 0 \quad q2 = \frac{-(\cos(b))^2}{\pi}$$

$$b = \text{asin} \left[\left(\frac{2 \cdot a}{A} \right) - 1 \right]$$

$$\text{Find}(w, A, q1, q2, b) = \begin{pmatrix} 0.59 \\ 0.525 \\ 0.017 \\ -0.058 \\ 1.131 \end{pmatrix}$$

Библиографический список

1. Савин М.М. Теория автоматического управления: учеб. пособие /М.М. Савин, В.С. Елсуков, О.Н. Пятина; под ред. д.т.н., проф. В.И. Лачина.- Ростов н/Д: Феникс, 2007.- 469 с.
2. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления /Под ред. В.А. Бесекерского. М.: Наука, 1978. 512 с.
3. Кирьянов Д.В. Самоучитель Mathcad 11. СПб.: БХБ-Петербург, 2003. 560 с.
4. Гультияев А. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: Практ. пособие. СПб.: КОРОНА принт, 1999. 228 с.