



Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Методические указания

Д.Н. ПОПОВ, М.В. СИУХИН

РАСЧЕТ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ

Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н.Э. БАУМАНА

Д.Н. Попов, М.В. Сиухин

РАСЧЕТ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ

*Методические указания к выполнению
домашнего задания по дисциплине
«Управление техническими системами»*

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2004

УДК 62-52
ББК 32.96
П68

Рецензент *А.В. Яковлев*

Попов Д.Н., Сиухин М.В.

П68 Расчет систем стабилизации: Методические указания к выполнению домашнего задания по дисциплине «Управление техническими системами». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 24 с.: ил.

ISBN 5-7038-2557-1

Изложены методики проверки устойчивости, синтеза корректирующих звеньев и расчета на ЭВМ переходных процессов в приложении к двум системам стабилизации с гидроприводами.

Для студентов, обучающихся по специальности «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика».

Ил. 13. Библиогр. 3 назв.

УДК 62-52
ББК 32.96

**Дмитрий Николаевич Попов
Михаил Викторович Сиухин**

РАСЧЕТ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ

Методические указания

Редактор *С.А. Серебрякова*

Корректор *Л.И. Малютина*

Компьютерная верстка *В.И. Товстоногов*

Подписано в печать 25.08.04. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Печ. л. 1,5. Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,22.

Тираж 100 экз. Изд. № 87. Заказ 157

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

ISBN 5-7038-2557-1

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004

ВВЕДЕНИЕ

В методических указаниях описана последовательность выполнения домашнего задания, цель которого состоит в том, чтобы привить студентам навыки использования методов теории автоматического регулирования и управления при проектировании динамических гидро- и пневмосистем [1]. Для этого выбраны две системы стабилизации с дроссельными гидроприводами. Математические модели систем представлены в линейном виде.

В домашнем задании предложено сначала с помощью логарифмических амплитудных и фазовых частотных характеристик разомкнутых контуров систем проверить устойчивость изучаемой системы при заданных преподавателем параметрах. Такая система, как правило, будет неустойчивой. Чтобы сделать систему устойчивой, следует провести синтез корректирующего звена. Затем, для освоения основных методов исследования устойчивости линейных систем, к скорректированной системе нужно применить критерий Найквиста, используя амплитудно-фазовую частотную характеристику разомкнутого контура системы; критерий Михайлова; критерий Гурвица. В заключение, после расчета на ЭВМ переходного процесса, необходимо найти показатели качества регулирования.

1. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ СИСТЕМ

В домашнем задании должны быть проведены расчеты системы автоматического регулирования угловой скорости вала двигателя (рис. 1) или системы стабилизации угла наклона платформы к горизонтальной плоскости (рис. 2).

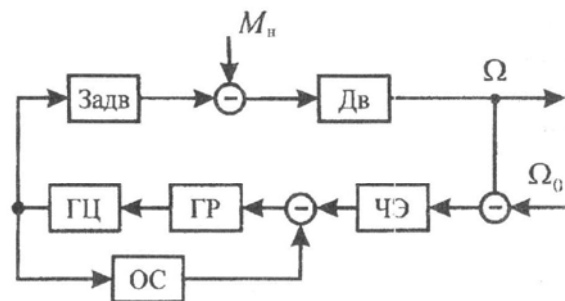


Рис. 1

Регулируемым объектом в первой системе (см. рис. 1) является двигатель Дв. Чувствительный элемент ЧЭ регулятора измеряет отклонение угловой скорости Ω вала двигателя от заданного значения Ω_0 и создает управляющее воздействие на гидрораспределитель ГР, который, в свою очередь, управляет гидроцилиндром ГЦ. Выходное звено ГЦ соединено с регулирующим органом, которым служит задвижка (Задв) двигателя. При изменении нагрузки на двигатель (изменении M_n) угловая скорость вала двигателя отклоняется

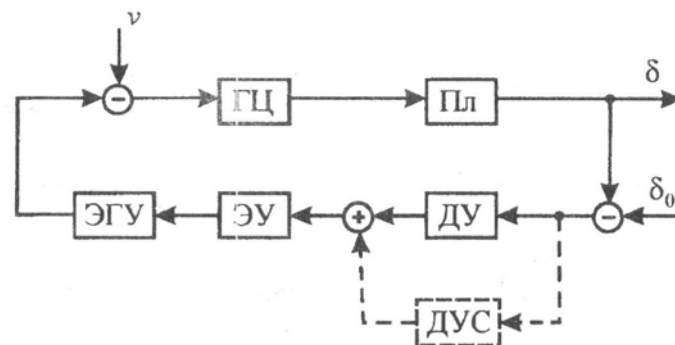


Рис. 2

от Ω_0 . Регулятор, управляя открытием задвижки, должен так изменить приток энергоносителя к двигателю, чтобы был восстановлен установившийся режим работы двигателя и с требуемой точностью осуществлена стабилизация угловой скорости вала двигателя. Для обеспечения устойчивости системы регулятор снабжен отрицательной обратной связью ОС.

Во второй системе (см. рис. 2) регулируемым объектом является платформа Пл, угол δ наклона которой к горизонтальной плоскости устанавливается при помощи гидроцилиндра ГЦ. Чувствительным элементом, измеряющим отклонение δ от заданного значения δ_0 , служит гироскопический датчик угла ДУ. Электрический сигнал с выхода ДУ сначала усиливается электронным усилителем ЭУ, а затем поступает на вход электрогидравлического усилителя ЭГУ, в котором электрический ток преобразуется в перемещение золотника гидрораспределителя, управляющего гидроцилиндром. Для корректирования динамических характеристик системы параллельно с ДУ может быть подключен датчик угловой скорости ДУС. Действие внешних возмущений представлено скоростью v изменения положения опоры гидроцилиндра.

При определенных допущениях, не противоречащих основным физическим процессам, которыми сопровождается регулирование

рассмотренных выше систем, для них можно получить структурные схемы, составленные из типовых динамических звеньев.

Для первой системы (см. рис. 1) примем, что саморегулирование двигателя мало и поэтому в структурной схеме двигатель можно представить интегрирующим звеном с постоянной времени T_a (рис. 3). Кроме того, условимся, что при постоянной силе, необходимой для изменения открытия задвижки двигателя, и малой массе задвижки перепад давления в гидроцилиндре можно считать постоянным во времени и не учитывать сжимаемость рабочей жидкости в полостях гидроцилиндра. В этом случае передаточную функцию гидроцилиндра также можно привести к передаточной функции интегрирующего звена с постоянной времени T_r .

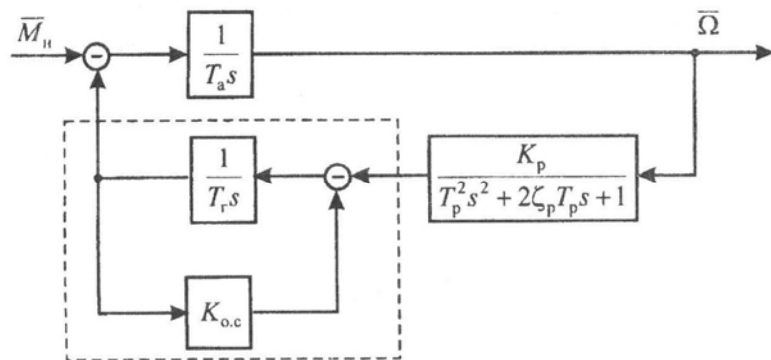


Рис. 3

Чувствительный элемент регулятора, выполненный в виде центробежного датчика угловой скорости вала двигателя, можно описать передаточной функцией колебательного звена с постоянной времени T_p и коэффициентом относительного демпфирования z_p . Из-за наличия в замкнутом контуре помимо колебательного звена двух интегрирующих звеньев система будет структурно неустойчивой, поэтому интегрирующее звено, соответствующее гидроцилиндру, должно быть охвачено отрицательной обратной связью. Наиболее просто такую обратную связь осуществить с помощью

пропорционального звена с коэффициентом усиления $K_{o.c.}$. Тогда по правилам эквивалентных преобразований структурных схем передаточную функцию интегрирующего звена с отрицательной обратной связью можно заменить передаточной функцией аperiodического звена

$$W_{r1}(s) = \frac{K_{o.c.1}}{T_{r1}s + 1},$$

где $K_{o.c.1} = \frac{1}{K_{o.c.}}$, $T_{r1} = \frac{T_r}{K_{o.c.}}$.

Допущения, позволяющие получить структурную схему второй системы с аналогичными первой системе динамическими звеньями (см. рис. 2), состоят в следующем. Датчик угла, измеряющий отклонение платформы от горизонтальной плоскости, является настолько быстродействующим, что его можно считать пропорциональным звеном с коэффициентом усиления $K_{i\delta}$ (рис. 4). Электронный усилитель вместе с электрогидравлическим усилителем по своим динамическим характеристикам близки к аperiodическому звену первого порядка с постоянной времени $T_{r,y}$ и коэффициентом усиления K_{vi} .

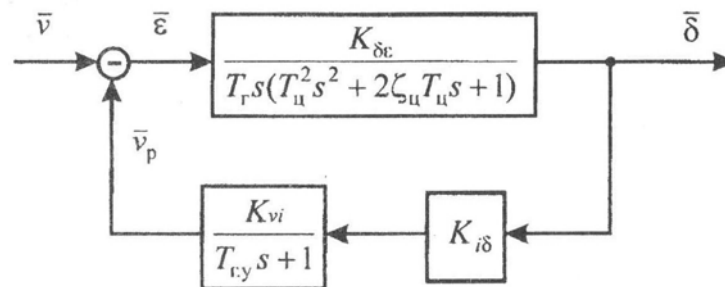


Рис. 4

При перемещении платформы на выходное звено гидроцилиндра действует переменная во времени нагрузка, в связи с чем, в отличие от первой системы, при выводе передаточной функции гидроцилиндра нужно учитывать сжимаемость рабочей жидкости в его

полостях. Поэтому гидроцилиндр с платформой описывает передаточная функция, объединяющая передаточные функции последовательно соединенных звеньев: интегрирующего звена с постоянной времени T_i и колебательного звена, имеющего постоянную времени T_c и коэффициент относительного демпфирования ζ_c . Преобразование линейного перемещения выходного звена гидроцилиндра в угол поворота платформы учитывают с помощью коэффициента $K_{\delta\epsilon}$.

Сравнивая изображенные на рис. 3 и 4 структурные схемы, легко заметить, что они имеют одинаковые замкнутые контуры, каждый из которых состоит из интегрирующего, колебательного, пропорционального и аperiodического первого порядка звеньев. Устойчивость, качество и точность регулирования таких систем с астатическими управляемыми объектами могут быть рассчитаны по единой методике, причем вычисления будут иметь одинаковую степень сложности независимо от того, какая из двух систем рассматривается. Следует также заметить, что приведенные выше структурные схемы охватывают достаточно широкий круг гидравлических и пневматических устройств, математические модели которых близки к линейным непрерывным системам.

Вследствие инструментальных погрешностей, зависящих от точности изготовления и сборки элементов систем, действия сил сухого трения и других причин, значения установившихся ошибок будут отличаться от рассчитанных по линейным моделям. Это отличие будет тем меньше, чем ближе статические характеристики реальных элементов к линейным.

2. ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ

В дальнейшем система автоматического регулирования угловой скорости вала двигателя именуется системой А, а система автоматической стабилизации положения платформы — системой Б. Вид системы и значения всех необходимых для расчета параметров

указывает преподаватель. Значения параметров соответствуют безразмерным переменным, которые должны быть выбраны исходя из следующих соотношений:

$$\bar{\Omega} = \frac{\Omega}{\Omega_0}; \quad \bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_0}; \quad \bar{M}_{дв} = \bar{M}_н = \frac{M}{M_{\max}};$$

$$\bar{v} = \frac{v}{v_{\max}}; \quad \bar{v}_p = \frac{v_p}{v_{\max}}; \quad \bar{\epsilon} = \frac{\epsilon}{\epsilon_{\max}}.$$

В этих соотношениях чертой сверху обозначены безразмерные величины, индексами «0» и «max» отмечены номинальные и максимальные значения переменных.

При выполнении домашнего задания требуется:

1. Построить логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики (ЛАХ и ЛФХ) всех звеньев, входящих в структурную схему системы.

2. Проверить устойчивость системы по логарифмическим амплитудным и фазовым частотным характеристикам ее разомкнутого контура. Если при заданных параметрах системы не обеспечиваются рекомендуемые запасы по фазе и по амплитуде, то необходимо провести корректирование системы. Для корректирования системы А в регулятор следует ввести отрицательную изодромную обратную связь и определить постоянную времени этой связи. Систему Б можно скорректировать дополнительным датчиком угловой скорости, которому в структурной схеме соответствует дифференцирующее звено, соединенное параллельно с пропорциональным звеном, описывающим датчик угла. Постоянную времени дифференцирующего звена находят по результатам корректирования системы.

3. Для освоения основных методов анализа устойчивости линейных систем проверить устойчивость скорректированной системы по критериям Найквиста, Михайлова и Гурвица.

4. Рассчитать на ЭВМ переходный процесс, вызванный единичным ступенчатым воздействием на систему, и определить частотные характеристики (ЛАХ и ЛФХ) замкнутой системы.

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА И ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

3.1. Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики звеньев системы

Как было отмечено выше, структурные схемы систем А и Б содержат динамические звенья одинакового вида, причем эти звенья относятся к типовым. ЛАХ и ЛФХ таких звеньев можно построить по рассмотренной в курсе лекций методике, в соответствии с которой для апериодического звена первого порядка и колебательного звена сначала вычисляют сопрягающие частоты и на бумаге с полулוגарифмической сеткой проводят низкочастотную и высокочастотную асимптоты при коэффициентах усиления, равных единице [1]. Затем по графикам поправок в окрестности каждой сопрягающей частоты находят точки самих ЛАХ. Если какое-либо одно из звеньев или оба звена имеют отличные от единицы коэффициенты усиления K , то оси частот ЛАХ этих звеньев должны быть смещены на $20 \lg K$ вниз (при $K > 1$) или вверх (при $K < 1$). ЛАХ интегрирующего звена представляет собой прямую, имеющую наклон -20 дБ/дек и пересекающую ось частот в точке, для которой значение частоты равно отношению единицы к постоянной времени звена. ЛФХ апериодического звена первого порядка и колебательного звена можно построить по точкам, вычислить их координаты по формулам, приведенным в курсе лекций. Координаты точек ЛФХ интегрирующего звена находить не нужно, так как эта характеристика является прямой, проходящей параллельно оси частот на расстоянии, равном $-\pi/2$.

Кроме того, логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики апериодического звена первого порядка, а также колебательного звена полезно получить с помощью ЭВМ.

3.2. Проверка устойчивости замкнутой системы по логарифмической амплитудной характеристике и логарифмической фазовой характеристике ее разомкнутого контура

Разомкнутые контуры систем А и Б содержат по три последовательно включенных типовых звена (рис. 5). Сложив ЛАХ и ЛФХ этих звеньев, получим характеристики для каждого разомкнутого контура. На рис. 6 приведены ЛАХ и ЛФХ отдельных звеньев системы А. Там же показаны ЛАХ и ЛФХ разомкнутого контура такой системы при значениях параметров, обеспечивающих требуемые запасы устойчивости по амплитуде и по фазе. Если запасы устойчивости по амплитуде и по фазе окажутся меньше допустимых, то следует скорректировать систему в соответствии с п.2 задания.

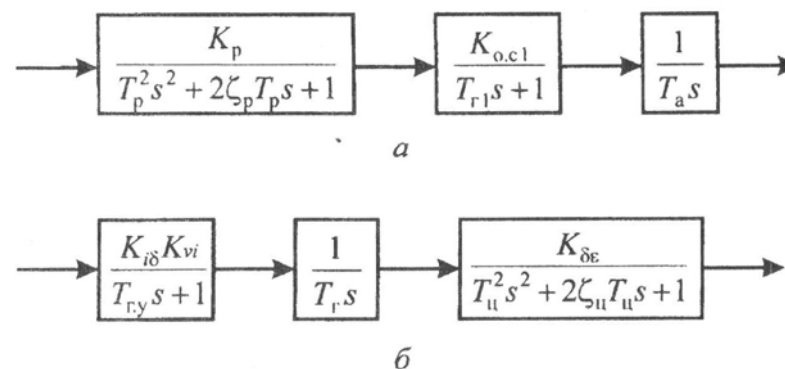


Рис. 5

На рис. 7 показан разомкнутый контур системы А после введения отрицательной изодромной обратной связи, которая охватывает апериодическое звено первого порядка, соответствующее ненагруженному гидроцилиндру с жесткой отрицательной обратной связью от выходного звена к золотнику гидрораспределителя. Изодромная обратная связь описывается передаточной функцией реального дифференцирующего звена с постоянной времени T_k .

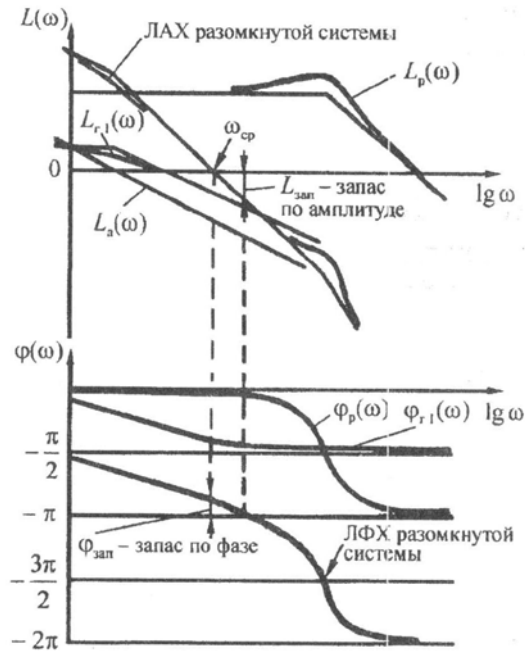


Рис. 6

Проведя эквивалентное преобразование участка структурной схемы, обведенного на рис. 7 штриховой линией, находим

$$W_{r2}(s) = \frac{K_{o.c1}(T_k s + 1)}{T_k T_{r1} s^2 + [(1 + K_{o.c1} K_k) T_k + T_{r1}] s + 1}, \quad (1)$$

где $W_{r2}(s)$ — передаточная функция ненагруженного гидроцилиндра, охваченного жесткой и изодромной обратными связями.

Значение постоянной времени T_k должно быть выбрано так, чтобы скорректированная система имела высокие показатели качества. Для этого желаемая ЛАХ системы в окрестности частоты среза должна иметь наклон -20 дБ/дек, а при значениях частот

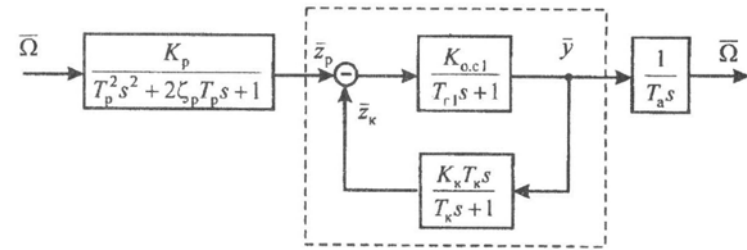


Рис. 7

$\omega_k = 1/T_k$ и ω_2 , ограничивающих указанный участок ЛАХ, ординаты L_k и L_2 могут быть равны соответственно $+16$ дБ и -16 дБ (рис. 8).

Указанное условие может быть выполнено, если полюсы передаточной функции (1) будут действительными отрицательными числами, т. е. если

$$[(1 + K_{o.c1} K_k) T_k + T_{r1}]^2 > 4 T_k T_{r1}.$$

Тогда передаточную функцию (1) можно привести к виду

$$W_{r2}(s) = \frac{K_{o.c1}(T_k s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (2)$$

где значения постоянных времени T_1 и T_2 определяются из соотношений $T_1 = \frac{1}{\omega_1}$ и $T_2 = \frac{1}{\omega_2}$.

Используя свойства корней квадратного уравнения, полученного приравниванием к нулю знаменателя передаточной функции (1), находим

$$T_k T_{r1} = \frac{1}{\omega_1 \omega_2}; \quad \omega_1 + \omega_2 - \omega_k = \frac{1 + K_{o.c1} K_k}{T_{r1}},$$

откуда следует

$$K_k = \frac{(\omega_1 + \omega_2 - \omega_k) \omega_k - \omega_1 \omega_2}{\omega_1 \omega_2 K_{o.c1}}. \quad (3)$$

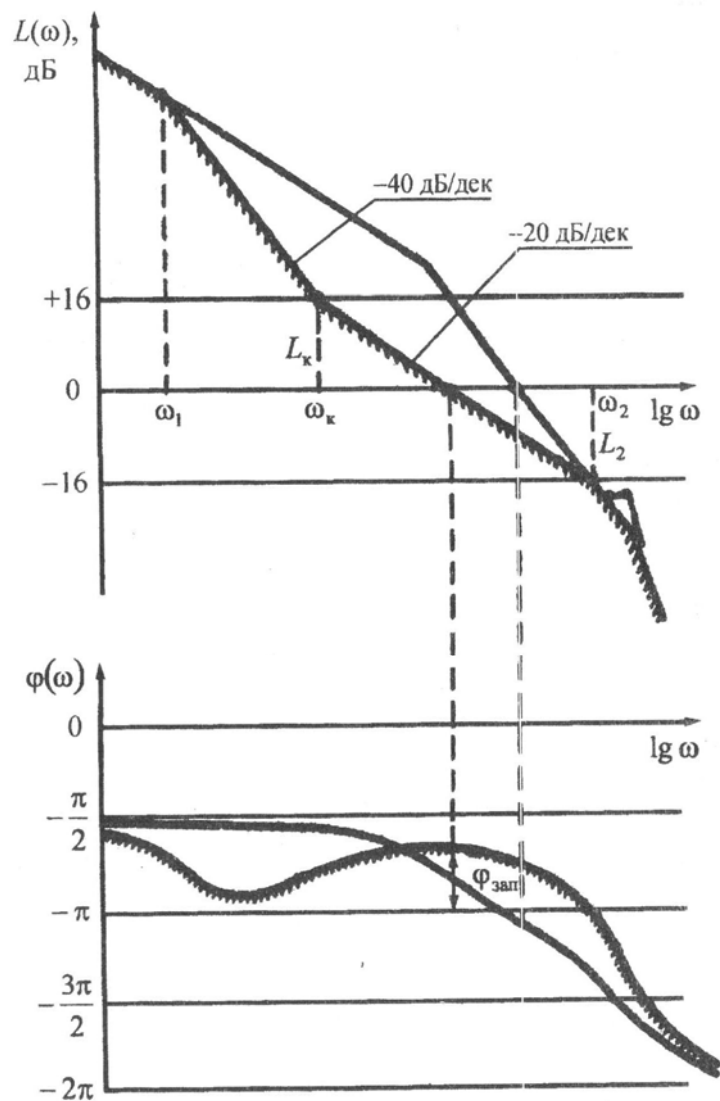


Рис. 8

Вычислив по формуле (3) значение K_k , необходимо убедиться, что запас по фазе будет близким к рекомендуемому значению. С этой целью строят ЛАХ и ЛФХ скорректированной разомкнутой системы. Общий вид таких характеристик показан на рис. 8.

После корректирования системы Б структурная схема ее разомкнутого контура будет такой, как на рис. 9. Объединенная передаточная функция пропорционального звена и параллельно включенного с ним дифференцирующего звена имеет вид

$$W_d(s) = K_{i\delta}(T_{d1}s + 1), \quad (4)$$

где $T_{d1} = T_d/K_{i\delta}$.

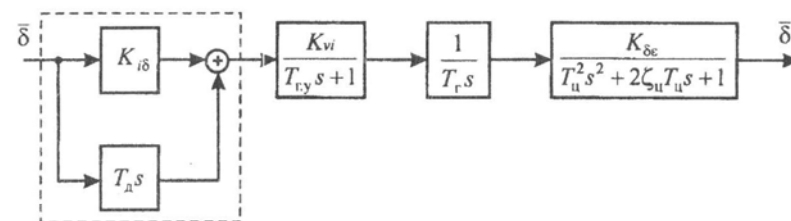


Рис. 9

Для определения постоянной времени T_{d1} корректирующего звена на ЛАХ и ЛФХ разомкнутого контура некорректированной системы Б нужно дополнительно построить ЛАХ и ЛФХ форсирующего звена первого порядка (рис. 10), имеющего передаточную функцию

$$W_{d1}(s) = T_{d1}s + 1. \quad (5)$$

При этом сопрягающую частоту

$$\omega_{d1} = \frac{1}{T_{d1}} \quad (6)$$

желательно выбрать так, чтобы в окрестности частоты среза наклон ЛАХ разомкнутого контура скорректированной системы составлял

–20 дБ/дек, а запасы по амплитуде и по фазе были бы равны рекомендуемым значениям. По выбранной частоте $\omega_{д1}$ и соотношению (6) вычисляют постоянную времени $T_{д1}$. Чтобы не усложнять передаточную функцию (4), допускается уменьшать $T_{д1}$ и увеличивать $\zeta_{ц}$.

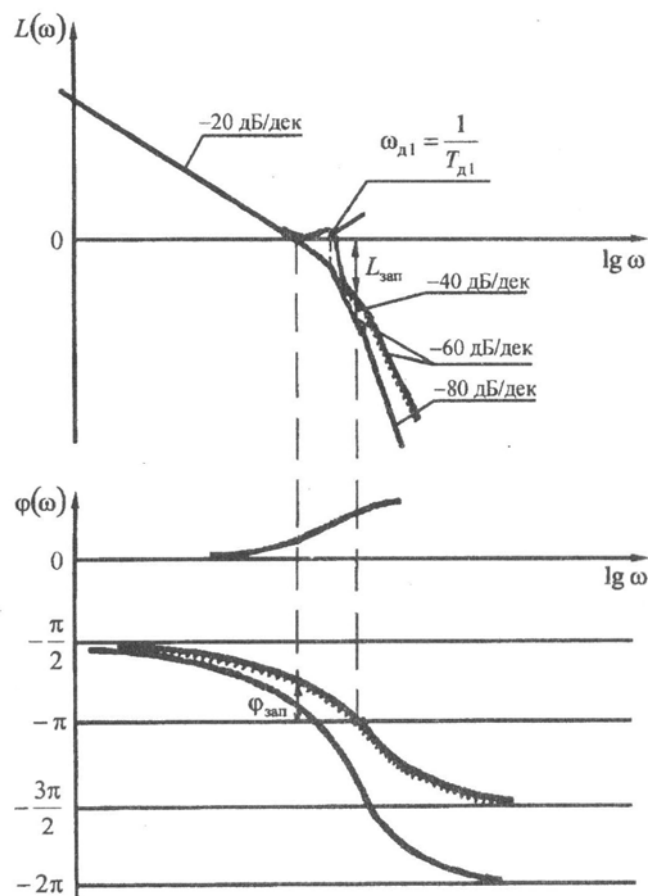


Рис. 10

3.3. Расчет устойчивости системы по разным критериям

Критерий Найквиста. При проверке устойчивости системы по критерию Найквиста необходимо построить амплитудно-фазовую частотную характеристику $W(j\omega)$ разомкнутого контура системы. Такая характеристика может быть получена в результате подстановки $s = j\omega$ в передаточную функцию $W(s)$, которая определяется по передаточным функциям входящих в систему звеньев. В разомкнутых контурах систем А и Б звенья включены последовательно, если системы не корректировались. Если системы были скорректированы, то последовательное соединение звеньев можно получить после приведения участков структурных схем с корректирующими звеньями (на рис. 7 и 9 обведены штриховыми линиями) к одному эквивалентному звену.

Для последовательно соединенных звеньев передаточную функцию $W(s)$ находят перемножив передаточные функции этих звеньев. Координаты $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ амплитудно-фазовой частотной характеристики $W(j\omega)$ могут быть также вычислены на ЭВМ.

Другой способ построения амплитудно-фазовой частотной характеристики $W(j\omega)$ состоит в том, что по ЛАХ разомкнутого контура системы для ряда частот ω вычисляют значения $A(\omega)$ и для этих же частот по ЛАХ находят значения $\varphi(\omega)$. Для вычисления $A(\omega)$ служит соотношение

$$\lg A(\omega) = \frac{L(\omega)}{20}.$$

Значения $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ являются полярными координатами $W(j\omega)$, которая не должна охватывать точку $(-1; j0)$, так как разомкнутые контуры систем А и Б нейтрально устойчивы, а сами системы здесь проверяются уже после того, как была установлена их устойчивость по ЛАХ и ЛФХ. Чтобы лучше представить себе тесную связь рассмотренных выше методов проверки устойчивости систем по частотным характеристикам, полезно, построив $W(j\omega)$, найти запасы по амплитуде и по фазе и убедиться в том, что они совпадают с ранее полученными по ЛАХ и ЛФХ запасами. Для

примера на рис. 11 дана АФЧХ разомкнутого контура некорректированной системы А.

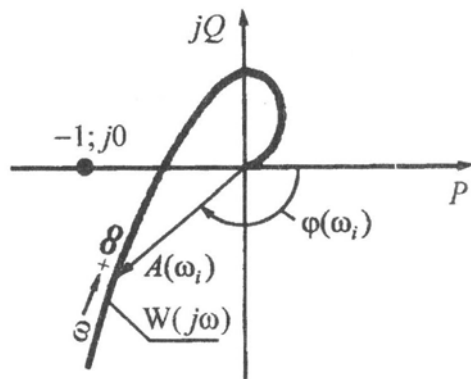


Рис. 11

Критерий Михайлова. Для применения критерия Михайлова необходимо иметь характеристическое уравнение замкнутой системы. Это уравнение можно найти, приравняв нулю знаменатель передаточной функции замкнутой системы, или, что дает тот же результат, приравняв нулю сумму полиномов знаменателя и числителя передаточной функции разомкнутой системы.

Замкнутую некорректированную систему А можно описать передаточной функцией

$$\Phi_A(s) = \frac{W_a(s)}{1 + W_a(s)W_{ц.п}(s)W_{г1}(s)}, \quad (7)$$

$$\text{где } W_a(s) = \frac{1}{T_a(s)}; W_{ц.п}(s) = \frac{K_p}{T_p^2 s^2 + 2\zeta_p T_p s + 1}; W_{г1}(s) = \frac{K_{о.с1}}{T_{г1}s + 1}.$$

Передаточной функции (7) соответствует характеристическое уравнение

$$1 + W_a(s)W_{ц.п}(s)W_{г1}(s) = 0. \quad (8)$$

Подставив в уравнение (8) передаточные функции отдельных звеньев и выполнив обычные преобразования, получим

$$a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0, \quad (9)$$

$$\text{где } a_4 = T_a T_{г1} T_p^2; a_3 = T_a T_p (T_p + 2T_{г1} \zeta_p); a_2 = T_a (T_{г1} + 2T_p \zeta_p); a_1 = T_a; a_0 = K_p K_{о.с1}.$$

При $s = j\omega$ левая часть уравнения (9) может быть представлена комплексной функцией

$$D(j\omega) = X + jZ, \quad (10)$$

$$\text{где } X = a_4 \omega^4 - a_2 \omega^2 + a_0; Z = \omega(a_1 - a_3 \omega^2).$$

Изменяя в функции (10) ω от 0 до $+\infty$, следует построить на комплексной плоскости годограф Михайлова, который при устойчивой системе должен начинаться на положительной части действительной оси и в направлении против хода часовой стрелки проходить через четыре квадранта комплексной плоскости (рис. 12).

При скорректированной системе А в передаточной функции (7) следует заменить $W_{г1}(s)$ на $W_{г2}(s)$, а затем с учетом соотношения (2) в той же последовательности найти функцию $D(j\omega)$ и построить годограф Михайлова.

Для замкнутой некорректированной системы Б имеем:

$$\Phi_B(s) = \frac{W_{г.н}(s)}{1 + K_{ид} W_{г.у}(s) W_{г.н}(s)}, \quad (11)$$

$$\text{где } W_{г.н}(s) = \frac{K_{\delta\varepsilon}}{T_{гс}(T_{нс} c^2 s^2 + 2\zeta_{нс} T_{нс} s + 1)}; W_{г.у}(s) = \frac{K_{vi}}{T_{г.у}s + 1}.$$

Общий вид характеристического уравнения замкнутой системы и комплексной функции $D(j\omega)$, определяемых по передаточной функции (11), будет таким же, как для некорректированной

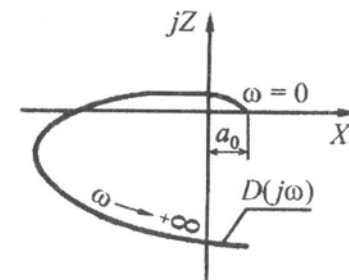


Рис. 12

системы А. Отличие состоит в значениях коэффициентов, входящих в уравнения (9) и (10). В данном случае

$$a_4 = T_{\text{ц}}^2 T_{\text{г}} T_{\text{г.у}}; \quad a_3 = T_{\text{ц}} T_{\text{г}} (T_{\text{ц}} + 2T_{\text{г.у}} \zeta_{\text{ц}}); \quad a_2 = T_{\text{г}} (T_{\text{г.у}} + 2T_{\text{ц}} \zeta_{\text{ц}}); \\ a_1 = T_{\text{г}}; \quad a_0 = K_{\text{id}} K_{\text{vi}} K_{\text{дс}}.$$

Если система Б была скорректирована, то в передаточной функции (11) коэффициент усиления K_{id} следует заменить на передаточную функцию (4). При этом изменится значение коэффициента a_1 .

В остальном проверка устойчивости системы Б по критерию Михайлова выполняется так же, как системы А.

Критерий Гурвица. Согласно критерию Гурвица, система устойчива, если все коэффициенты ее характеристического уравнения положительны и определители, составленные из этих коэффициентов, больше нуля. Значения коэффициентов известны из расчета устойчивости системы по критерию Михайлова, а для составления определителей следует применить рассмотренный в курсе лекций алгоритм [1,2].

3.4. Расчет переходного процесса, логарифмических амплитудной и частотной характеристик замкнутых систем с помощью ЭВМ

Математическое описание рассматриваемых систем можно представить системами дифференциальных уравнений, записанными в форме Коши. Так, для скорректированной системы А после перехода от передаточных функций к дифференциальным уравнениям имеем:

$$\frac{d\bar{\Omega}}{dt} = \frac{1}{T_{\text{а}}} \bar{y} - \frac{1}{T_{\text{а}}} \bar{M}_{\text{н}}; \quad (12)$$

$$\frac{d\bar{z}_{\text{р}}}{dt} = \bar{\sigma}; \quad (13)$$

$$\frac{d\bar{\sigma}}{dt} = -\frac{K_{\text{р}}}{T_{\text{р}}^2} \bar{\Omega} - \frac{2\zeta_{\text{р}}}{T_{\text{р}}} \bar{\sigma} - \frac{1}{T_{\text{р}}^2} \bar{z}_{\text{р}}; \quad (14)$$

$$\frac{d\bar{y}}{dt} = \frac{1}{T_{\text{г}}} \bar{z}_{\text{р}} - \frac{K_{\text{о.с}}}{T_{\text{г}}} \bar{y} - \frac{1}{T_{\text{г}}} \bar{z}_{\text{к}}; \quad (15)$$

$$\frac{d\bar{z}_{\text{к}}}{dt} = \frac{K_{\text{к}}}{T_{\text{г}}} \bar{z}_{\text{р}} - \frac{K_{\text{к}} K_{\text{о.с}}}{T_{\text{г}}} \bar{y} - \left(\frac{1}{T_{\text{к}}} + \frac{K_{\text{к}}}{T_{\text{г}}} \right) \bar{z}_{\text{к}}. \quad (16)$$

Наиболее компактной и удобной формой записи математической модели при выполнении расчетов переходных процессов на ЭВМ является векторная форма [1].

Математическое описание в векторной форме произвольной системы n -го порядка с числом входов m , числом выходов r состоит из двух уравнений:

векторного дифференциального уравнения состояния

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu; \quad (17)$$

векторного алгебраического уравнения выхода

$$y = Cx + Du, \quad (18)$$

где $u = [u_1 u_2 \dots u_m]^T$ — вектор входных величин; $y = [y_1 y_2 \dots y_r]^T$ — вектор выхода; $x = [x_1 x_2 \dots x_n]^T$ — вектор состояния; A — квадратная матрица (n, n) ; B — прямоугольная матрица (n, m) ; C — прямоугольная матрица (r, n) ; D — прямоугольная матрица (r, m) .

Рассматриваемые системы А и Б имеют по одному входу и выходу, поэтому для них $m = 1$ и $r = 1$.

Для скорректированной системы А $x_1 = \bar{\Omega}$, $x_2 = \bar{z}_{\text{р}}$, $x_3 = \bar{\sigma}$, $x_4 = \bar{y}$, $x_5 = \bar{z}_{\text{к}}$.

Из уравнений (12)–(18) находим:

$$B = \begin{bmatrix} -1/T_{\text{а}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad D = 0;$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1/T_{\text{а}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_{\text{р}}/T_{\text{р}}^2 & -1/T_{\text{р}}^2 & -2\zeta_{\text{р}}/T_{\text{р}} & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_{\text{г}} & 0 & -K_{\text{о.с}}/T_{\text{г}} & -1/T_{\text{г}} \\ 0 & K_{\text{к}}/T_{\text{г}} & 0 & -K_{\text{к}}K_{\text{о.с}}/T_{\text{г}} & -\left(\frac{1}{T_{\text{к}}} + \frac{K_{\text{к}}}{T_{\text{г}}} \right) \end{bmatrix}.$$

Для получения переходного процесса на вход подают ступенчатое единичное входное воздействие $u = \bar{M}_H(t) = -1(t)$, чему соответствует

$$\bar{M}_H(t) = 1 \text{ при } t < 0;$$

$$\bar{M}_H(t) = 0 \text{ при } t \geq 0.$$

Начальные условия: $t = 0$; $x_1 = \bar{\Omega} = -\delta_{\text{ост}}$, $x_2 = \bar{z}_p = K_{\text{ос}}$; $x_3 = \bar{\sigma} = 0$; $x_4 = \bar{y} = 1$; $x_5 = \bar{z}_k = 0$. Моделирование по уравнениям (17), (18) может быть проведено на ЭВМ в различных пакетах прикладных программ. На рис. 13 приведен пример переходного процесса, полученного с помощью пакета «МВТУ» [3].

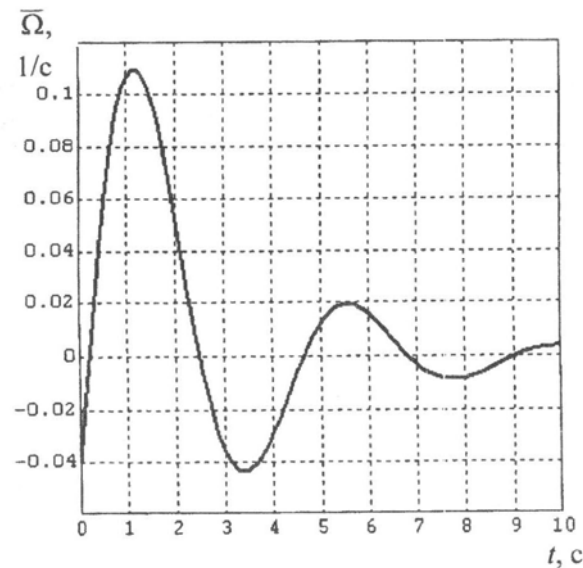


Рис. 13

Для скорректированной системы Б в результате проведения описанных выше действий получаем матрицы и векторы того же размера, что и для системы А.

$$x_1 = \bar{\delta}; \quad x_4 = \bar{v}_p.$$

Ненулевые коэффициенты матрицы А:

$$a_{12} = 1; \quad a_{23} = 1; \quad a_{32} = -\frac{1}{T_{\text{ц}}^2}; \quad a_{33} = -\frac{2\zeta_{\text{ц}}}{T_{\text{ц}}};$$

$$a_{34} = -\frac{1}{T_{\text{ц}}^2}; \quad a_{35} = -\frac{2\zeta_{\text{ц}}}{T_{\text{ц}}};$$

$$a_{36} = -\frac{K_{\delta\epsilon}}{T_{\text{г}}T_{\text{ц}}^2}; \quad a_{41} = \frac{K_{vi}K_{i\delta}}{T_{\text{г}}}; \quad a_{42} = \frac{T_{\text{д}}K_{vi}}{T_{\text{г}}}; \quad a_{43} = \frac{-1}{T_{\text{г}}}.$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad D = 0; \quad u = \bar{v} = 1(t).$$

Начальные условия нулевые.

По полученному переходному процессу следует определить наибольшую динамическую ошибку и время переходного процесса.

На ЭВМ также с использованием структурной схемы системы А или Б нужно найти ЛАХ и ЛФХ замкнутой системы.

4. ОФОРМЛЕНИЕ ВЫПОЛНЕННОГО ЗАДАНИЯ

Оформленное домашнее задание должно содержать: структурные схемы системы, исходные данные для расчета, результаты расчета системы с таблицами и графиками, приведенными в соответствующих пунктах настоящих методических указаний. Все страницы следует пронумеровать и сброшюровать в тетрадь с титульным листом, на котором нужно указать название задания, фамилию и инициалы студента, а также индекс группы. К оформленному заданию следует приложить полученный на ЭВМ график переходного процесса, по которому должны быть определены: динамическая ошибка, установившаяся ошибка и время регулирования, а также рассчитанные на ЭВМ ЛАХ и ЛФХ замкнутой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение, 1987. 474 с.
2. Солодовников В.В., Плотников В.П., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. 492 с.
3. Программный комплекс «МВТУ» — современное средство автоматизированного исследования и проектирования систем автоматического управления / Козлов О.С., Кондаков Д.Е., Скворцов Л.М. и др. // 2-я междунар. конф. по проблемам управления: Избр. тр. М.: 2003. Т. 2. С. 249–256.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| 1. Структурные схемы систем | 4 |
| 2. Задание для расчета системы | 8 |
| 3. Последовательность расчета и основные формулы | 10 |
| 3.1. Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики звеньев системы | 10 |
| 3.2. Проверка устойчивости замкнутой системы по логарифмической амплитудной характеристике и логарифмической фазовой характеристике ее разомкнутого контура | 11 |
| 3.3. Расчет устойчивости системы по разным критериям | 17 |
| 3.4. Расчет переходного процесса, логарифмических амплитудной и частотной характеристик замкнутых систем с помощью ЭВМ | 20 |
| 4. Оформление выполненного задания | 23 |
| Список литературы | 24 |