

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**

13/21/10

**Одобрено кафедрой
«Локомотивы
и локомотивное хозяйство»**

АВТОМАТИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА ЛОКОМОТИВОВ

**Руководство к выполнению лабораторных работ
для студентов VI курса
специальности**

190301 ЛОКОМОТИВЫ (Т)



Москва – 2008

С о с т а в и т е л и : д-р техн. наук, проф. А.С. Космодамианский,
канд. техн. наук, ст. преп. Ю.В. Попов,
ст. преп. Н.Н. Стрекалов

Р е ц е н з е н т : д-р техн. наук, проф. В.П. Смирнов

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ

Цель работы. *Изучение и освоение методики экспериментального определения статических характеристик элементов автоматики.*

Общие положения

1. При проектировании автоматической системы регулирования должны быть известны статические характеристики и параметры составляющих эту систему функциональных элементов — объекта регулирования, измерительного и усилительно-преобразующих устройств, регулирующего органа и исполнительного механизма. Любой функциональный элемент автоматической системы регулирования имеет входную $x_{\text{вх}}$ и выходную $x_{\text{вых}}$ координаты. Статическими характеристиками функционального элемента по регулируемому или возмущающему воздействию называются зависимости выходной величины от входной в установившихся режимах при неизменных иных воздействиях (см. рис. 1). По статическим характеристикам функционального элемента можно определить значения коэффициентов передачи (усиления) элемента. Коэффициенты передачи являются статическими параметрами функционального элемента.

Коэффициент передачи элемента равен тангенсу угла наклона к оси $x_{\text{вх}}$ касательной к статической характеристике, проведенной в данной ее точке.

Для нелинейных статических характеристик, изображенных на рис. 1, коэффициент передачи функционального элемента в точке A будет равен $k_A = \frac{x_{\text{вых1}} - 0}{x_{\text{вх1}} - 0} = \frac{x_{\text{вых1}}}{x_{\text{вх1}}}$, а в точке B — $k_B = \frac{x_{\text{вых2}} - 0}{x_{\text{вх2}} - 0} = \frac{x_{\text{вых2}}}{x_{\text{вх2}}}$. Участок статической характеристики

между точками A и B может быть линеаризован. В этом случае участок нелинейной статической характеристики между точками

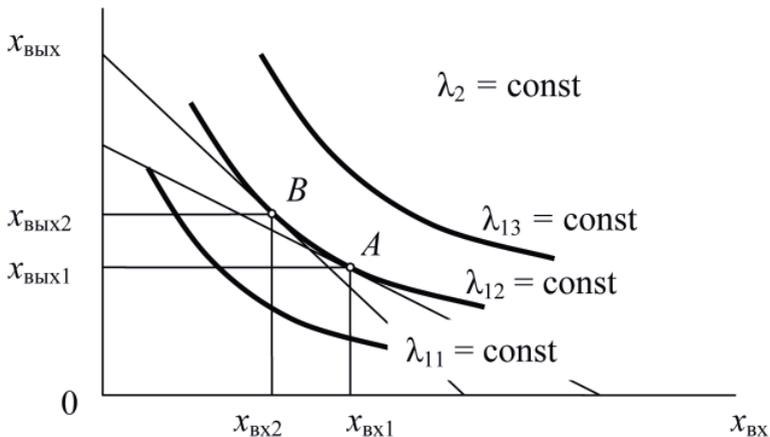


Рис. 1. Общий вид статических характеристик объекта регулирования

ми A и B заменяется отрезком прямой, соединяющей обе эти точки, и тогда коэффициент передачи функционального элемента будет равен $k_{AB} = -\frac{x_{\text{ВЫХ}2} - x_{\text{ВЫХ}1}}{x_{\text{ВХ}1} - x_{\text{ВХ}2}}$. При таком расположении статических характеристик коэффициенты передачи принимают отрицательные значения.

2. Методику экспериментального определения статических характеристик элементов автоматики рассмотрим на примере системы охлаждения тяговой выпрямительной установки как объекта регулирования температуры. Выходной величиной системы охлаждения тяговой выпрямительной установки является температура корпуса диода t_d (регулируемая величина φ), входной величиной — объемный расход охлаждающего воздуха $G_{\text{вз}}$ или скорость воздушного потока $V_{\text{вз}}$ (регулирующее воздействие μ), возмущающими воздействиями — нагрузочный ток $I_{\text{вУ}}$ (возмущение λ_1) и температура охлаждающего воздуха $t_{\text{вз}}$ (возмущение λ_2).

Принципиальная схема лабораторного стенда представлена на рис. 2. В систему охлаждения входят собственно тяговая выпрямительная установка 1, вентилятор 2, воздуховоды, воз-

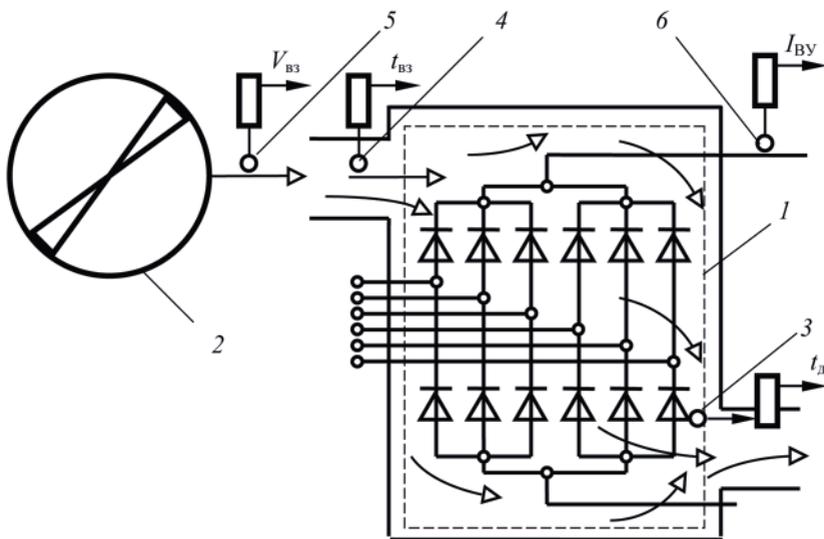


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторного стенда

душные фильтры. Активно-индуктивная нагрузка (на рис. 2 не показана) тяговой выпрямительной установки на лабораторном стенде имитирует тяговые электродвигатели. Лабораторный стенд оборудован следующими датчиками: датчиком температуры корпуса диода 3, датчиком температуры охлаждающего воздуха 4, датчиком скорости воздушного потока 5, датчиком тока нагрузки тяговой выпрямительной установки 6.

Статические характеристики могут быть получены после обработки кривых нагревания корпуса диода $t_d(\tau)$ при $V_{B3i} = \text{const}$, где τ — текущее время. Так, с кривой нагревания $t_d(\tau)$ при $V_{B31} = \text{const}$, получена точка статической характеристики $t_{d1}(V_{B31})$, соответствующая установившемуся тепловому режиму. При этом $I_{BY} = \text{const}$ и $t_{B3} = \text{const}$. Аналогично получены остальные точки статической характеристики.

Экспериментальная статическая характеристика объекта регулирования температуры может быть получена также другим путем (рис. 3). Устанавливают режим: $V_{B31} = \text{const}$, при этом $I_{BY} = \text{const}$ и $t_{B3} = \text{const}$. По окончании переходного процес-

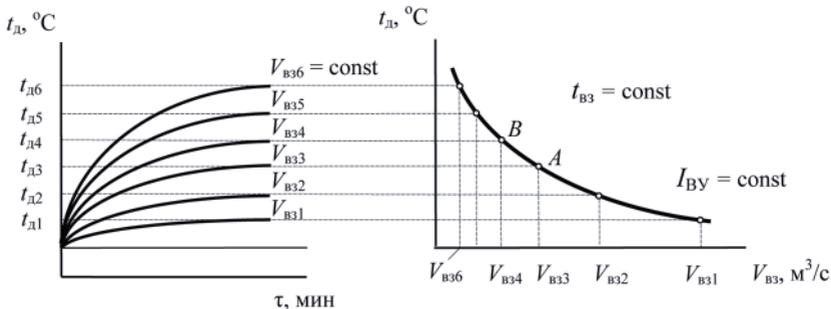


Рис. 3. Построение статической характеристики объекта регулирования температуры по регулируемому воздействию

са фиксируют значение $t_{д1}$, затем выставляют $V_{B32} = \text{const}$ при $I_{BY} = \text{const}$ и $t_{B3} = \text{const}$ и вновь после того, как величина t_d примет новое установившееся значение $t_{д2}$, фиксируют его, и т.д.

3. Коэффициент передачи объекта регулирования температуры по регулируемому воздействию для участка статической характеристики AB определяется как

$$k_{\mu} = (t_{д4} - t_{д3}) / (V_{B34} - V_{B33}), \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с} / \text{м}^3. \quad (1)$$

Поскольку $V_{B34} < V_{B33}$, то k_{μ} принимает отрицательное значение.

Из рис. 3 видно, что статическая характеристика нелинейна, это означает, что коэффициент передачи объекта регулирования температуры есть величина переменная.

Последовательность выполнения работы

1. Запустить испытательный стенд
2. Установить режим: $V_{B31} = \text{const}$, при этом $I_{BY} = \text{const}$ и $t_{B3} = \text{const}$. По окончании переходного процесса зафиксировать значение $t_{д1}$. Выставить $V_{B32} = \text{const}$ (при тех же $I_{BY} = \text{const}$ и $t_{B3} = \text{const}$) и вновь после того, как величина t_d примет новое установившееся значение $t_{д2}$, зафиксировать его, и т.д. Результаты измерений свести в табл. 1.

Таблица 1

$V_{вз}, \text{ м/с}$						
$t_d, \text{ }^\circ\text{C}$						

3. Пользуясь выражением (1) рассчитать значение коэффициента передачи объекта регулирования температуры по регулируемому воздействию для участка статической характеристики, указанного преподавателем. Результаты расчетов свести в табл. 2.

Таблица 2

$V_{вз}, \text{ м/с}$					
$k_{\mu}, \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{с/м}$					

4. Построить статическую характеристику объекта регулирования температуры.

5. Построить зависимость коэффициента передачи объекта регулирования температуры от регулирующего воздействия $k_{\mu}(V_{вз})$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ

Цель работы. Изучение и освоение методики экспериментального определения динамических характеристик и параметров элементов автоматики.

Общие положения

Методика экспериментального исследования динамических свойств объекта регулирования базируется на основных положениях классической теории автоматических систем.

Методика включает следующие основные положения:

1. Переходные временные характеристики объекта регулирования определяются при однократном скачкообразном изменении только одного из воздействий — регулирующего или одного из возмущающих при поддержании постоянными остальных.

2. Величина однократного скачкообразного воздействия не должна превышать 15% от максимально возможной величины вносимого возмущения. Обычно это воздействие составляет от 5 до 10%.

3. Однократное скачкообразное воздействие вносится при установившемся режиме объекта регулирования. При достижении нового установившегося состояния вносится новое однократное скачкообразное воздействие того же значения, но обратного знака. Полученные по динамическим характеристикам значения динамических параметров усредняют и относят к середине интервала изменения данного воздействия.

Исследования динамики объекта регулирования проводятся на том же лабораторном стенде (см. рис. 2 в лабораторной работе № 1).

При построении одноконтурных автоматических систем регулирования с *П*-регулятором, работающим по отклонению измеренного значения регулируемой величины от заданного значения, достаточно определения динамических характеристик и параметров лишь по регулирующему воздействию μ во

всем возможном диапазоне изменения возмущающих воздействий λ_i .

Одну и ту же экспериментальную переходную функцию можно аппроксимировать различными видами передаточных функций. Если аппроксимировать экспериментальную переходную функцию решением дифференциального уравнения первого порядка с запаздыванием, то аппроксимирующая передаточная функция запишется в виде

$$W_\mu(p) = k_\mu \frac{e^{-p\tau_\mu}}{T_\mu p + 1}, \quad (1)$$

где k_μ — коэффициент передачи объекта регулирования по регулирующему воздействию;

τ_μ — время запаздывания по регулирующему воздействию;

T_μ — постоянная времени объекта по регулирующему воздействию.

Решение линейного дифференциального уравнения первого порядка с запаздыванием и нулевыми начальными условиями, соответствующего передаточной функции вида (1), будет иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{ll} t_d(\tau) = 0; & 0 \leq \tau \leq \tau_\mu \\ t_d(\tau) = t_{d\infty} \left[1 - e^{-\frac{\tau - \tau_\mu}{T_\mu}} \right]; & \tau > \tau_\mu. \end{array} \right. \quad (2)$$

Существуют программы обработки экспериментальных данных, позволяющих эмпирически определять значения динамических параметров элементов автоматики с помощью ПЭВМ. Однако, для приближенного определения значений τ_μ и T_μ можно использовать графический способ (рис. 1). В этом случае через точку перегиба экспериментальной кривой (точка *A*) проводят наклонную прямую, пересекающую ось абсцисс (ось времени) и линию установившегося значения регулируемой величины $t_{d\infty}$. Отрезок от начала координат до точки пересечения этой прямой оси времени будет соответствовать времени запаздыва-

ния τ_μ . Отрезок между точкой пересечения наклонной прямой оси времени и перпендикуляром, опущенным на ось времени из точки пересечения наклонной прямой линии установившегося значения регулируемой величины $t_{д\infty}$, соответствует постоянной времени объекта регулирования температуры T_μ .

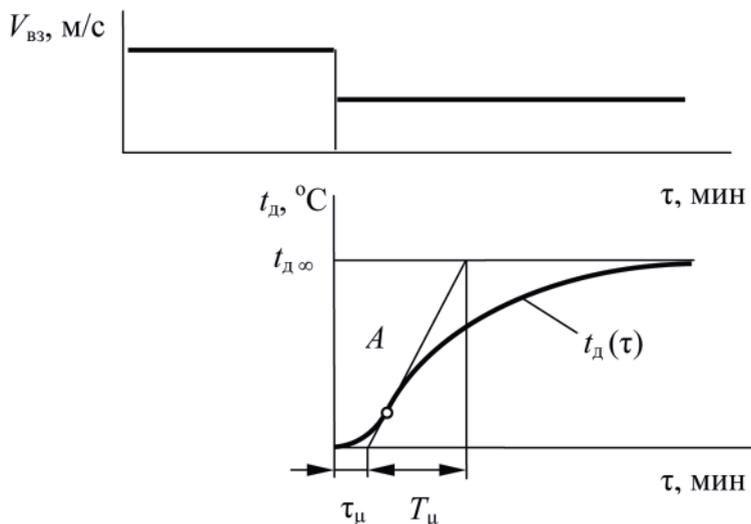


Рис. 1. Определение динамических параметров объекта регулирования температуры по переходной временной характеристике, полученной после скачкообразного изменения регулирующего воздействия

Последовательность выполнения работы

1. Запустить испытательный стенд.
2. Установить режим: $V_{вз1} = \text{const}$, при этом $I_{вв} = \text{const}$ и $t_{вз} = \text{const}$. По окончании переходного процесса зафиксировать значение $t_{д1}$.

3. Изменить режим охлаждения тяговой выпрямительной установки, уменьшив скачком количество охлаждающего воздуха до величины $V_{вз}$ при тех же значениях $I_{вв} = \text{const}$ и $t_{вз} = \text{const}$. Через равные промежутки времени фиксировать значения $t_{д}$ до

наступления установившегося режима. Результаты измерений свести в табл. 1.

Таблица 1

τ , мин						
t_d , °C						
τ , мин						
t_d , °C						

4. Определить значения τ_μ и T_μ , в соответствии с рис. 1.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

Цель работы. Изучение и освоение методики исследования автоматических систем регулирования на устойчивость.

Общие положения

В теории автоматических систем широко применяются косвенные методы исследования устойчивости систем регулирования, поскольку непосредственное нахождение корней характеристических уравнений высоких степеней во многих случаях затруднительно. Косвенные методы содержат критерии, с помощью которых можно исследовать устойчивость системы без решения ее характеристического уравнения: критерии И.А. Вышнеградского, Гурвица, А.В. Михайлова, Наквиста-Михайлова и др. Для возможности использования первых трех критериев необходимо располагать уравнением системы. Если же известны экспериментальные характеристики элементов системы, удобнее пользоваться амплитудно-фазовым критерием Найквиста-Михайлова, при этом имеется возможность одновременного исследования качества работы системы регулирования. Для построения амплитудно-фазово-частотной характеристики должна быть известна передаточная функция системы регулирования в разомкнутом состоянии.

Передаточная функция системы регулирования в разомкнутом состоянии определяется как произведение передаточных функций составляющих систему элементов — объекта регулирования, измерительного и усилительно-преобразующих устройств, исполнительного механизма, регулирующего органа (рис. 1).

$$W_{p.c.}(p) = W_{\mu}(p) \cdot W_{из}(p) \cdot W_{уу}(p) \cdot W_{им}(p) \cdot W_{ро}(p). \quad (1)$$

После того, как составлена передаточная функция в разомкнутом состоянии, составляется комплексная частотная функ-

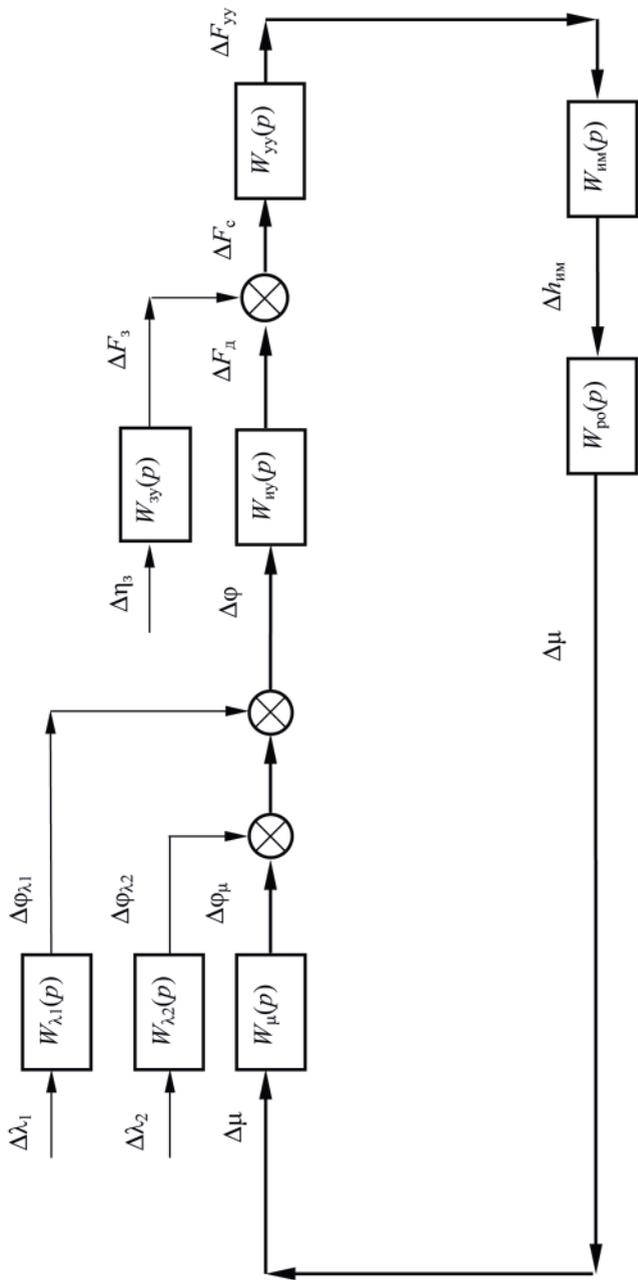


Рис. 1. Структурная схема автоматической системы регулирования

ция разомкнутой системы $W_{\text{p.c.}}(j\omega)$ и оценивается расположение годографа вектора $W_{\text{p.c.}}(j\omega)$ относительно точки $[-1, j0]$ при изменении ω от 0 до $+\infty$. Критерий устойчивости Найквиста-Михайлова формулируется следующим образом: если линейная автоматическая система регулирования в разомкнутом состоянии устойчива и ее частотная характеристика $W_{\text{p.c.}}(j\omega)$ при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$ не охватывает точку на комплексной плоскости с координатами $[-1, j0]$, то после замыкания этой системы она также будет устойчивой.

Если в передаточной функции $W_{\text{p.c.}}(p)$ системы регулирования в разомкнутом состоянии передаточные функции составляющих систему звеньев записаны в виде $W_{\mu}(p) = k_{\mu} \frac{e^{-p\tau_{\mu}}}{T_{\mu}p+1}$, $W_{\text{и.у.}}(p) = k_{\text{и.у.}}$, $W_{\text{у.у.}}(p) = k_{\text{у.у.}}$, $W_{\text{и.м.}}(p) = k_{\text{и.м.}}$, $W_{\text{р.о.}}(p) = k_{\text{р.о.}}$, тогда передаточная функция системы регулирования в разомкнутом состоянии

$$W_{\text{p.c.}}(p) = k_{\text{p.c.}} \frac{e^{-p\tau}}{Tp+1}, \quad (2)$$

где $k_{\text{p.c.}} = k_{\mu} \cdot k_{\text{и.у.}} \cdot k_{\text{у.у.}} \cdot k_{\text{и.м.}} \cdot k_{\text{р.о.}}$.

Запишем комплексную частотную функцию разомкнутой системы

$$W_{\text{p.c.}}(j\omega) = k_{\text{p.c.}} \frac{\cos \omega\tau - j \sin \omega\tau}{Tj\omega + 1}. \quad (3)$$

Умножим числитель и знаменатель в выражении комплексной частотной функции на сопряженный знаменателю множитель $(Tj\omega - 1)$, проведем несложные преобразования, разделим мнимую и действительную части

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= k_{\text{p.c.}} \frac{(\cos \omega\tau - j \sin \omega\tau)(Tj\omega - 1)}{(Tj\omega + 1)(Tj\omega - 1)} = \\ &= k_{\text{p.c.}} \frac{Tj\omega \cos \omega\tau - Tj\omega j \sin \omega\tau - \cos \omega\tau + j \sin \omega\tau}{T^2 j^2 \omega^2 + Tj\omega - Tj\omega - 1} = \\ &= -k_{\text{p.c.}} \frac{T\omega \sin \omega\tau - \cos \omega\tau + j \sin \omega\tau + Tj\omega \cos \omega\tau}{T^2 \omega^2 + 1} = \\ &= k_{\text{p.c.}} \frac{\cos \omega\tau - T\omega \sin \omega\tau}{T^2 \omega^2 + 1} - jk_{\text{p.c.}} \frac{\sin \omega\tau + T\omega \cos \omega\tau}{T^2 \omega^2 + 1}. \end{aligned}$$

Выражения для действительной и мнимой частей комплексной частотной функции запишутся в виде

$$\operatorname{Re}^*(\omega) = k_{\text{p.c.}} \frac{\cos \omega \tau - T \omega \sin \omega \tau}{T^2 \omega^2 + 1}, \quad (4)$$

$$\operatorname{Im}^*(\omega) = -k_{\text{p.c.}} \frac{\sin \omega \tau - T \omega \cos \omega \tau}{T^2 \omega^2 + 1}. \quad (5)$$

Амплитуда (или модуль) рассчитывается по формуле

$$A(j\omega) = k_{\text{p.c.}} \sqrt{\operatorname{Re}^{*2}(j\omega) + \operatorname{Im}^{*2}(j\omega)}. \quad (6)$$

Фазу можно рассчитать, пользуясь выражением

$$\psi(j\omega) = -\operatorname{arctg} \left| \frac{\operatorname{Im}^*(j\omega)}{\operatorname{Re}^*(j\omega)} \right| - \omega \tau. \quad (7)$$

Величину $\omega \tau$ необходимо при этом перевести из радиан в градусы.

Расположение амплитудно-фазо-частотных характеристик разомкнутой автоматической системы регулирования на комплексной плоскости показано на рис. 2. Здесь $k_{\text{p.c.1}} < k_{\text{p.c.2}} < k_{\text{p.c.3}}$.

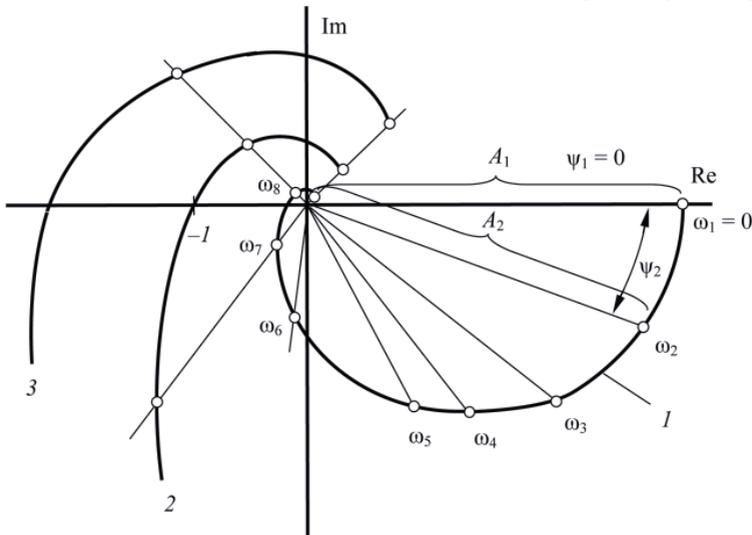


Рис. 2. Расположение амплитудно-фазо-частотных характеристик разомкнутой автоматической системы регулирования на комплексной плоскости

Последовательность выполнения работы

1. Подставляя в выражения (4) и (5) значения τ и T , вычислить значения Re^* и Im^* для различных ω и $k_{\text{p.c.}} = 1$. Результаты расчетов действительной и мнимой частей амплитудно-фазочастотных характеристик свести в табл. 1.

2. Пользуясь формулами (6) и (7), рассчитать значения амплитуды и фазы амплитудно-фазовых характеристик, результаты свести в табл. 2.

3. По данным табл. 2 построить расчетные амплитудно-фазочастотные характеристики разомкнутой автоматической системы регулирования температуры при различных значениях коэффициента передачи системы регулирования $k_{\text{p.c.}}$, учитывая, что $k_{\text{p.c.}} = k_{\mu} \cdot k_{\text{p}}$, где k_{p} — коэффициент передачи регулятора. Сделать выводы об устойчивости системы.

Используя программный модуль расчета амплитудно-фазочастотных характеристик разомкнутой автоматической системы регулирования в MathCad, рассчитать характеристики и приложить распечатки.

Таблица 1

Результаты расчета действительной и мнимой частей комплексной частотной функции автоматической системы регулирования температуры диодов тяговой выпрямительной установки в разомкнутом состоянии при $\tau = c$ и $T = c$

ω , рад/с	$\cos\omega\tau$	$T\omega\sin\omega\tau$	$\sin\omega\tau$	$T\omega\cos\omega\tau$	$T^2\omega^2+1$	$\text{Re}^*(\omega) =$ $= k_{\text{p.c.}} \frac{\cos\omega\tau - T\omega\sin\omega\tau}{T^2\omega^2 + 1}$	$\text{Im}^*(\omega) =$ $= -k_{\text{p.c.}} \frac{\sin\omega\tau + T\omega\cos\omega\tau}{T^2\omega^2 + 1}$
0	1	0	0	0	1	1	0
0,0005							
0,0010							
0,0015							
0,0020							
0,0050							
0,0100							
0,0300							
0,0500							

Результаты расчета модуля и фазы комплексной частотной функции автоматической системы регулирования температуры диодов тяговой выпрямительной установки в разомкнутом состоянии при $\tau = c$ и $T = c$

ω , рад/с	$Re^*(j\omega) = \frac{\cos \omega \tau - T \omega \sin \omega \tau}{T^2 \omega^2 + 1} = k_{p.c.}$	$Im^*(j\omega) = \frac{\sin \omega \tau + T \omega \cos \omega \tau}{T^2 \omega^2 + 1} = -k_{p.c.}$	$A(j\omega) = k_{p.c.} \sqrt{Re^2(j\omega) + Im^2(j\omega)}$		$\psi(j\omega) = -\arctg \left[\frac{Im^*(j\omega)}{Re^*(j\omega)} \right] - \omega \tau$ град
			$k_{p.c.} = 1,0$	$k_{p.c.} = k_{p.c.}$	
0	1	0	1	$k_{p.c.} =$	0
0,0005					
0,0010					
0,0015					
0,0020					
0,0050					
0,0100					
0,0300					
0,0500					

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Луков Н.М., Космодамианский А.С. Автоматические системы управления локомотивов: Учеб. для вузов. — М.: Маршрут, 2008. — 427 с.

2. Автоматика и автоматические системы локомотивов / Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Пугачев А.А. и др. — Уч. пос. — М.: РГОТУПС, 2008. — 102 с.

АВТОМАТИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА ЛОКОМОТИВОВ

Руководство к выполнению лабораторных работ

Редактор *В.К. Тихоньчева*
Корректор *В.В. Игнатова*
Компьютерная верстка *О.А. Денисова*

Тип. зак.	Изд. зак. 133	Тираж 500 экз.
Подписано в печать 12.03.08	Гарнитура NewtonC	Офсет
Усл. печ. л. 1,25		Формат 60×90 _{1/16}

Издательский центр РГОТУПСа,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПСа,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2