

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ, НАГРЕВАЕМОЙ В ВОДО-ВОДЯНОМ ПОВЕРХНОСТНОМ
ТЕПЛООБМЕННИКЕ****Хузина Алина Дамировна**

магистрант Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых Институт Архитектуры, Строительства и Энергетики, РФ.
г. Владимир

**DESIGN OF AN AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR WATER HEATED IN
A WATER-TO-SURFACE SURFACE HEAT****Alina Khuzina**

*Student, Vladimir State University named after Alexandra Grigorievich and Nikolai Grigorievich
Stoletov Institute of Architecture, Construction and Energy, Russia, Vladimir*

Аннотация. Представлены научно-технологические разработки для проектирования системы автоматического регулирования температуры воды, нагреваемой в водо-водяном поверхностном теплообменнике нужно использовать ПИД-регулятор. В АСР с ПИД-регулятором перемещение регулирующего органа происходит пропорционально отклонению, интегралу отклонения и скорости изменения регулируемой величины.

Из-за дифференциальной составляющей ПИД-регуляторы обладают повышенной чувствительностью. Они обеспечивают качественное регулирование технологических процессов, но требуют точной настройки и особого внимания к себе при эксплуатации. Поэтому обязательно выполнение всех технических условий.

Abstract. Scientific and technological developments for designing a system for automatically controlling the temperature of water heated in a water-to-surface surface heat exchanger are presented; it is necessary to use a PID controller. In an ASR with a PID controller, the movement of the regulatory body is proportional to the deviation, the integral of the deviation and the rate of change of the controlled variable.

Due to the differential component, PID controllers are highly sensitive. They provide high-quality regulation of technological processes, but require fine tuning and special attention to themselves during operation. Therefore, the fulfillment of all technical conditions is mandatory.

Ключевые слова: энергосбережение, отопление; теплообменник.

Keywords: energy saving; heating; teploobmennik.

Дан поверхностный водо-водяной теплообменник. Технологическая схема представлена на

рисунке.

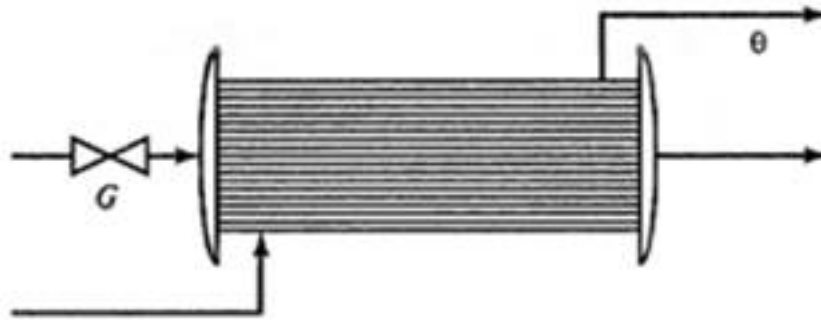


Рис. 1, 1. Технологическая схема теплообменника

Требуется составить техническое задание на создание системы автоматического регулирования (АСР) температуры нагреваемой воды θ изменением расхода греющей воды G . В качестве линейной математической модели объекта регулирования принято дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами. Переменными уравнения являются отклонения от статических значений для работающего теплообменника температуры нагреваемой воды $y(t)$ [$\theta_{\text{ст}}$] и расхода греющей воды $x(t)$ [$G_{\text{ст}}$]:

$$A_3 \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + A_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + A_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_0 x(t),$$

где A_3 [с^3]; A_2 [с^2]; A_1 [с] – коэффициенты модели, постоянные времени в соответствующих степенях и K_0 [$^\circ\text{С}/\text{м}^3/\text{ч}$] – коэффициент передачи по каналу расход греющей воды – температура нагреваемой воды.

Температура нагреваемой воды θ [$^\circ\text{С}$] и расход греющей воды G [$\text{м}^3/\text{ч}$] связаны $y(t)$ и $x(t)$ следующими выражениями:

$$\theta = \theta_{\text{ст}} + y(t) \text{ и } G = G_{\text{ст}} + x(t).$$

Наиболее вероятным возмущением являются колебания давления в линии греющей воды $\lambda(t)$, приводящие к изменениям ее расхода. Максимальное отклонение расхода ΔG в процентах от $G_{\text{ст}}$.

В расчетном задании необходимо провести настройку параметров регулятора на оптимальный режим работы АСР с использованием тестового ступенчатого возмущения по каналу регулирования. Показателем качества регулирования предлагается использовать линейный интегральный критерий.

Система должна иметь запас устойчивости не менее заданного значения. В качестве показателя запаса устойчивости использовать степень колебательности m .

Настроенная система регулирования должна отвечать следующим техническим требованиям:

1. Отклонение регулируемой температуры нагреваемой воды при возмущении расходом греющей воды ΔG не должно превышать заданного значения. Допустимое значение отклонения температуры нагреваемой воды $\Delta \theta$ в процентах от $\theta_{\text{ст}}$ выдается с исходными данными.
2. Максимальная скорость внесения регулирующего воздействия (изменение расхода

греющей воды) не должна превышать более чем в 3 раза максимальную скорость изменения регулируемой величины (изменение температуры нагреваемой воды без регулятора) – это ограничение по скорости реального исполнительного механизма.

3. Максимальная глубина регулирующего воздействия $\mu_{\max}$ не должна превышать новое установившееся значение μ более чем на 50% - это ограничение по диапазону работы регулирующего органа.

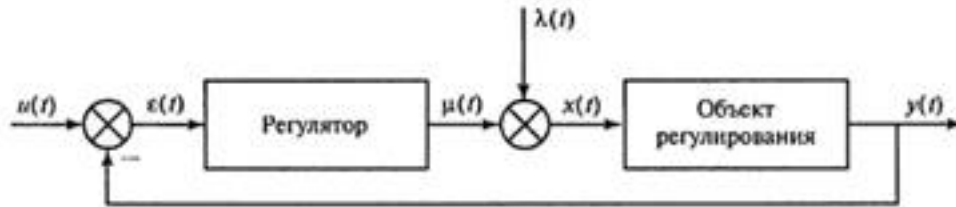


Рис. 12 Структурная схема АСР температуры нагреваемой воды

Рисунок 2. Структурная схема АСР температуры нагреваемой воды

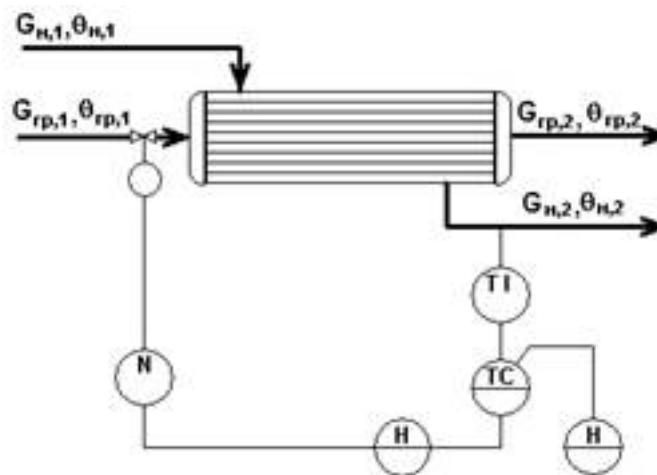


Рисунок 3. Функциональная схема АСР теплообменника, выполненная по **ГОСТ 21.404-85**

Исходные данные.

Вариант	A_3	A_2	A_1	K_0	$\theta_{ст}$	$G_{ст}$	$\Delta\theta$	ΔG	ψ
	27	27	9	0.8	455.17	82.36	2	2	0,82

Методические указания.

Программа 1 предназначена для определения в диалоговом режиме оптимальных параметров k_p и k_i Пи-регулятора или, при установленном значении k_d , ПИД-регулятора. Для

проверки правильности настройки в программе предусмотрено определение параметров регулятора на линии границы устойчивости и для неустойчивого режима работы АСР.

Критерием оптимальности используется минимальное значение линейного интеграла.

Ввод исходных данных варианта

ПРОГРАММА 1.

$$A3 := 27 \quad A2 := 27 \quad A1 := 9 \quad K_o := 0.8 \quad \psi_{зд} := 0.82$$

**Коэффициент
дифференциальной
составляющей регулятора.
Вводится при необходимости !**

$$m := \frac{-\ln(1 - \psi_{зд})}{2 \cdot \pi} \quad m = 0.273$$

$$Wop(m, \omega) := \frac{K_o}{A3 \cdot [\omega \cdot (-m + i)]^3 + A2 \cdot [\omega \cdot (-m + i)]^2 + A1 \cdot [\omega \cdot (-m + i)] + 1}$$

$$kd := 0$$

$$Kp(m, \omega) := 2 \cdot kd \cdot \omega \cdot m - \frac{\operatorname{Re}(Wop(m, \omega)) + m \cdot \operatorname{Im}(Wop(m, \omega))}{(\operatorname{Re}(Wop(m, \omega)))^2 + (\operatorname{Im}(Wop(m, \omega)))^2}$$

$$Ku(m, \omega) := \omega \cdot (1 + m^2) \cdot \left[kd \cdot \omega - \frac{\operatorname{Im}(Wop(m, \omega))}{(\operatorname{Re}(Wop(m, \omega)))^2 + (\operatorname{Im}(Wop(m, \omega)))^2} \right]$$

$$\omega := 0, 0.001 \dots 2$$

Расчет и установка автоматическая

$$\omega_{rm} := \text{root}\left(\frac{d}{d\omega} Ku(m, \omega), \omega, .001, 1\right) = 0.269$$

$$\omega_{r0} := \text{root}\left(\frac{d}{d\omega} Ku(0, \omega), \omega, .001, 1\right) = 0.408$$

$$ku_{opt} := Ku(m, \omega_{rm}) = 0.342$$

$$kp_{opt} := Kp(m, \omega_{rm}) = 1.64$$

$$ku_{gr} := Ku(0, \omega_{r0}) = 0.938$$

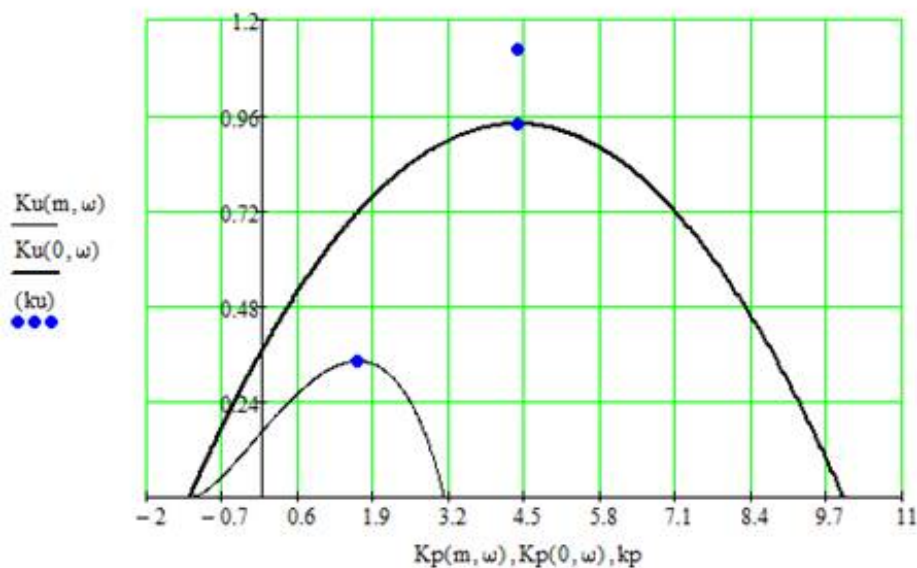
$$kp_{gr} := Kp(0, \omega_{r0}) = 4.375$$

$$kp := \begin{pmatrix} kp_{opt} \\ kp_{gr} \\ kp_{gr} \end{pmatrix}$$

$$ku := \begin{pmatrix} ku_{opt} \\ ku_{gr} \\ 1.2 \cdot ku_{gr} \end{pmatrix}$$

$$kp = \begin{pmatrix} 1.64 \\ 4.375 \\ 4.375 \end{pmatrix}$$

$$ku = \begin{pmatrix} 0.342 \\ 0.938 \\ 1.125 \end{pmatrix}$$



Заполняются из графиков

1 строка для $m=m_{ad}$,

2 строка для $m=0$,

3 строка $kp_3=kp_2, ku_3=1.2ku_2$

Программа 2 является основой для расчетного задания. С ее помощью мы оцениваем качество регулирования в оптимальном режиме, на границе устойчивости и для неустойчивого режима, а также выполняются ли технические требования работы АСР. Также принимаем решение о выборе ПИ- или ПИД-регулятора для рекомендации в техническом задании на проектирование системы регулирования.

Примем $kd=10$:

Расчет и установка автоматическая

$$\omega_{\text{zm}} := \text{root}\left(\frac{d}{d\omega} Ku(m, \omega), \omega, .001, 1\right) = 0.426$$

$$\omega_{t0} := \text{root}\left(\frac{d}{d\omega} Ku(0, \omega), \omega, .001, 1\right) = 0.561$$

$$ku_{\text{opt}} := Ku(m, \omega_{\text{zm}}) = 1.686$$

$$kp_{\text{opt}} := Kp(m, \omega_{\text{zm}}) = 5.804$$

$$ku_{gr} := Ku(0, \omega_{t0}) = 3.345$$

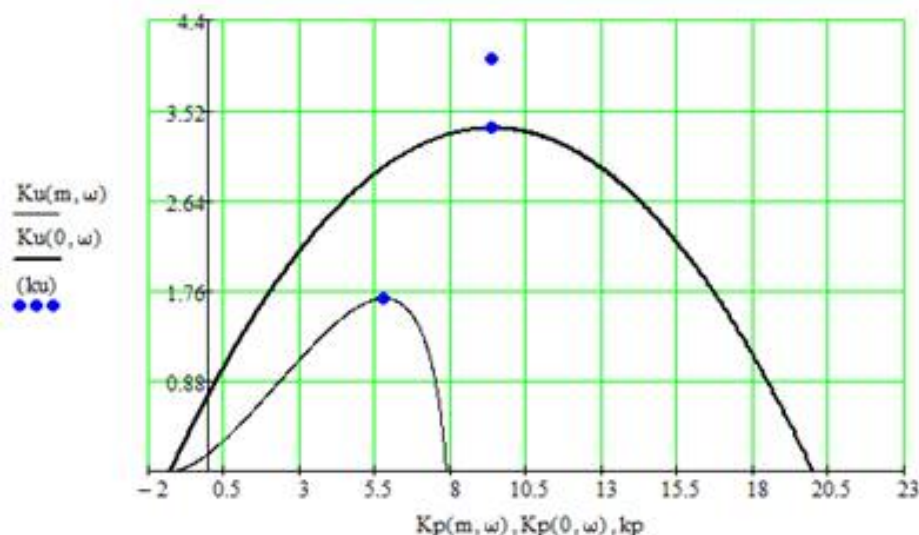
$$kp_{gr} := Kp(0, \omega_{t0}) = 9.375$$

$$kp := \begin{pmatrix} kp_{\text{opt}} \\ kp_{gr} \\ kp_{gr} \end{pmatrix}$$

$$ku := \begin{pmatrix} ku_{\text{opt}} \\ ku_{gr} \\ 1.2 \cdot ku_{gr} \end{pmatrix}$$

$$kp = \begin{pmatrix} 5.804 \\ 9.375 \\ 9.375 \end{pmatrix}$$

$$ku = \begin{pmatrix} 1.686 \\ 3.345 \\ 4.014 \end{pmatrix}$$



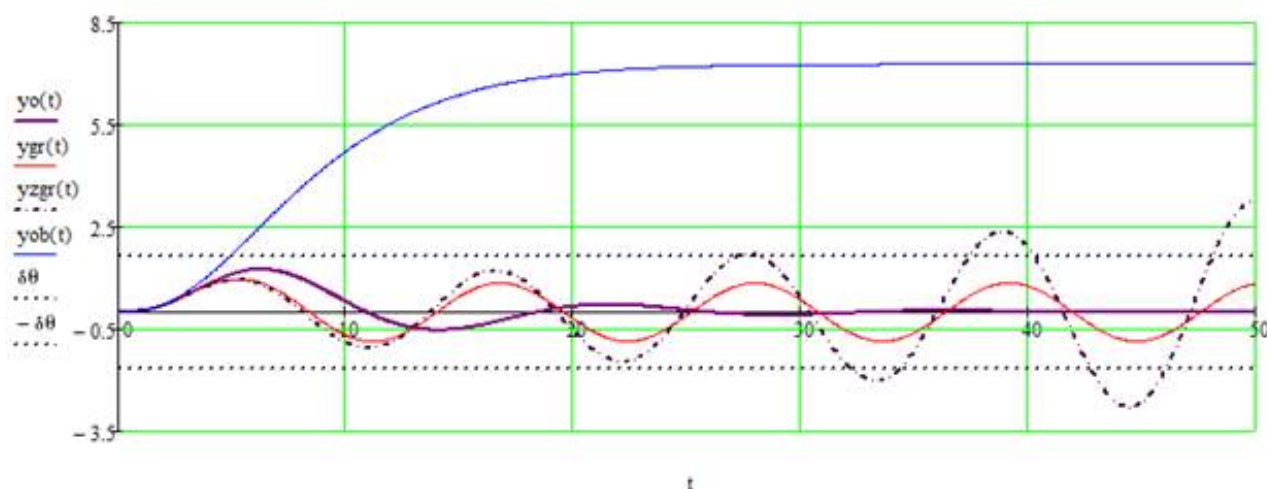
Заполняются из графиков
 1 строка для $m=t_{ad}$,
 2 строка для $m=0$,
 3 строка $kp_3=kp_2$, $ku_3=1.2ku_2$

4

31

1

$$80 = 1.647$$



Из графика видно, что при $k_d=10$, отклонение регулируемой температуры нагреваемой воды при возмущении расходом греющей воды не превышает заданное значение. Выполняется 1 техническое требование.

Расчет линейного интеграла

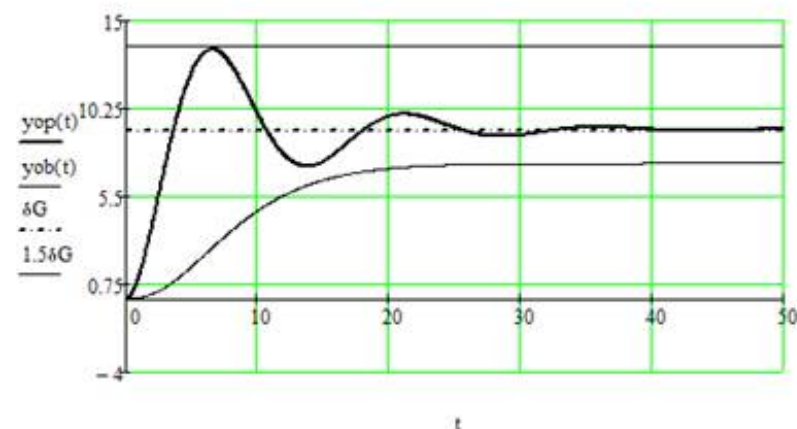
$$I := \int_0^{60} y_o(t) dt$$

$$I = 5.399$$

Расчет степени затухания

$$A_{\max} = 1.252$$

$$\psi := 1 - \frac{0.22093}{A_{\max}} \quad \psi = 0.824$$



Расчет максимальной скорости регулирующего воздействия

$$V_{\mu} := \frac{8.9499 - 4.6691}{3.6 - 2.25} \quad V_{\mu} = 3.171$$

Расчет максимальной скорости изменения температуры

$$V_0 := \frac{3.95 - 1.9943}{8.55 - 5.45} \quad V_0 = 0.631$$

$$O_{gr} := \frac{V_{\mu}}{V_0} \quad O_{gr} = 5.026$$

Предпочтительно
 $O_{gr} < 5$ для всех вариантов

Максимальная скорость внесения регулирующего воздействия не превышает более чем в 3 раза максимальную скорость изменения регулируемой величины. Выполняется 2 техническое требование. Максимальная глубина регулирующего воздействия не превышает новое установившееся значение более, чем на 50%. Выполняется 3 техническое требование.

В программе 3 рассчитаны и построены КЧХ объекта регулирования, замкнутой АСР для оптимальных параметров регулятора, на границе устойчивости и для неустойчивой АСР. Критерием правильности расчета является расположение точек годографа КЧХ. Для оптимальной устойчивой АСР в нижней полуплоскости, а для неустойчивой - в верхней. На границе устойчивости петля годографа имеет бесконечно большой радиус, и график вытягивается вдоль вещественной оси.

ПРОГРАММА 3

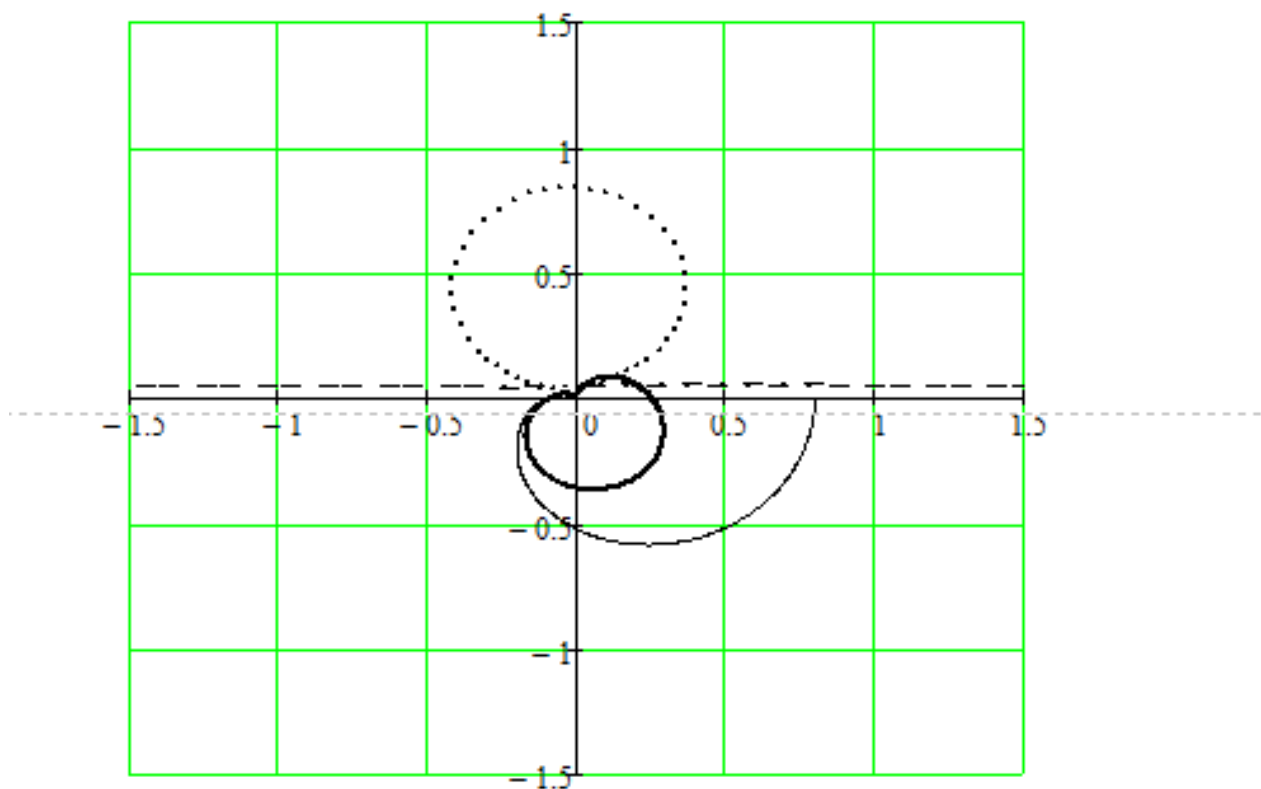
Расчет КЧХ

$$W_{\omega opt}(\omega) := kp_0 + \frac{ku_0}{i \cdot \omega} + kd \cdot i \cdot \omega \quad W_{\omega gr}(\omega) := kp_1 + \frac{ku_1}{i \cdot \omega} + kd \cdot i \cdot \omega \quad W_{\omega zgr}(\omega) := kp_2 + \frac{ku_2}{i \cdot \omega} + kd \cdot i \cdot \omega$$

$$W_{\omega zsopt}(\omega) := \frac{Wop(0, \omega)}{1 + W_{\omega opt}(\omega) \cdot Wop(0, \omega)} \quad W_{\omega zsgr}(\omega) := \frac{Wop(0, \omega)}{1 + W_{\omega gr}(\omega) \cdot Wop(0, \omega)}$$

$$W_{\omega zszgr}(\omega) := \frac{Wop(0, \omega)}{1 + W_{\omega zgr}(\omega) \cdot Wop(0, \omega)} \quad Ach(\omega) := |W_{\omega zsopt}(\omega) \cdot W_{\omega opt}(\omega)|$$

$$\omega := 0, 0.001 \dots 2$$

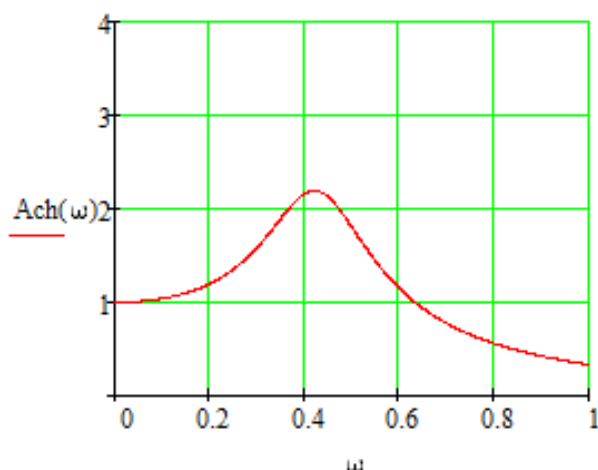


- КЧХ объекта регулирования
- КЧХ замкн. оптим. настр. системы
- - КЧХ замкн. сист. на границе устойчивости
- КЧХ замкн. неустойчивой системы

Видим, что расположение точек годографа КЧХ для оптимальной устойчивой АСР в нижней полуплоскости, а для неустойчивой — в верхней. На границе устойчивости петля годографа КЧХ имеет бесконечно большой радиус, и график вытягивается вдоль вещественной оси.

АЧХ замкнутой АСР

Она является оценкой частотного показателя запаса устойчивости M .



**Расчет частотного
показателя запаса
устойчивости M -большое**

$$i := 0..2000 \quad \omega_i := .00001 + .001 \cdot i$$

$$R_i := Ach(\omega_i) \quad M := \max(R)$$

$$M = 2.192$$

**Предпочтительно
 $M < 3,0$ для всех
вариантов**

Исследуем в малой окрестности оптимальных параметров значение интеграла I .

Таблица результатов

	"№/№"	"kp"	"ku"	"kd"	"I"	"ψ"	"ψзд"	"Amax"	"δ0"	"μmax"	"1,5δG"	"Ogr"	"M"	"ωрез"
Rez :=	1	1.64	0.342	0	26.665	0.867	0.82	3.2034	1.647	12.42	13.655	3.481	1.777	0.251
	2	5.804	1.686	10	5.399	0.825	0.82	1.2439	1.647	13.447	13.655	4.9026	2.192	0.423
	3	5.224	1.645	10	5.546	0.824	0.82	1.2941	1.647	13.194	13.655	4.59	2.124	0.385
	4	6.384	1.63	10	5.582	0.863	0.82	1.2169	1.647	13.416	13.655	4.654	2.168	0.469

Видим, что при найденных параметрах k_0 , обеспечивается лучшее качество работы АСР с выбранным алгоритмом регулирования. Для выбранного алгоритма нет других параметров, при которых интеграл I будет иметь меньше при заданной степени затухания и выполняются все технические требования.

Вывод: Для заданных исходных данных, для проектирования системы автоматического регулирования температуры воды, нагреваемой в водо-водяном поверхностном теплообменнике нужно использовать ПИД-регулятор. В АСР с ПИД-регулятором перемещение регулирующего органа происходит пропорционально отклонению, интегралу отклонения и скорости изменения регулируемой величины. Из-за дифференциальной составляющей ПИД-регуляторы обладают повышенной чувствительностью. Они обеспечивают качественное регулирование технологических процессов, но требуют точной настройки и особого внимания к себе при эксплуатации. Поэтому обязательно выполнение всех технических условий.