

4462/2-79



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

СЗУУ. 1В

К-43

5/II-79

13 - 12452

В.И.Киреев, В.Т.Толмачев, Ю.В.Хренов

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ
ОПТИМАЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ,
СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ РЕЖИМ КАМЕРЫ "ЛЮДМИЛА"

1979

13 - 12452

В.И.Киреев, В.Т.Толмачев, Ю.В.Хренов

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ
ОПТИМАЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ,
СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ РЕЖИМ КАМЕРЫ "ЛЮДМИЛА"

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Киреев В.И., Толмачев В.Т., Хренов Ю.В. 13 - 12452

Расчет параметров оптимальной настройки регуляторов, стабилизирующих режим камеры "Людмила"

В работе рассматриваются вопросы оптимизации параметров настройки контуров регулирования температуры и давления рабочей жидкости установки "Людмила". Приводится проверенная на установке методика расчета параметров настройки и результаты расчетов этих параметров. Показано, что качество процесса регулирования при расчетных параметрах удовлетворяет поставленным условиям.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Kireev V.I., Tolmachev V.T., Khrenov Yu.V. 13 - 12452

Calculation of Parameters of Controller Optimum Adjustment Stabilizing "Lyudmila" Chamber Regime

Some problems of optimization of controller parameters stabilizing temperature and pressure of "Lyudmila" chamber working liquid are considered. Methods of calculating parameters of adjustment tested on the setup are given. It is shown that the control process quality under calculated parameters satisfies the conditions given.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Для достижения качественного процесса регулирования недостаточно правильно выбрать алгоритм регулирования и информационную схему. Как видно из рис. 1, области настройки регуляторов довольно обширны. Следовательно, не менее важной задачей является выбор оптимальных параметров настройки регуляторов при заданных начальных требованиях к качеству процесса регулирования.

Возможны различные варианты отыскания оптимальных параметров настройки: экспериментальный подбор и расчет. Поскольку первый вариант в силу обширности областей настройки требует много времени в рабочих условиях работающей камеры, нам представляется целесообразным расчетный вариант.

Принимаем следующий критерий оптимальной настройки: параметры настройки регулятора могут считаться оптимальными, если среднеквадратичная ошибка регулирования достигает минимального значения при дополнительном условии, что показатель колебательности системы - M не превышает заранее заданной величины $M < M_{\text{доп}}$. Минимуму среднеквадратичной ошибки регулирования соответствует точка в области допус-

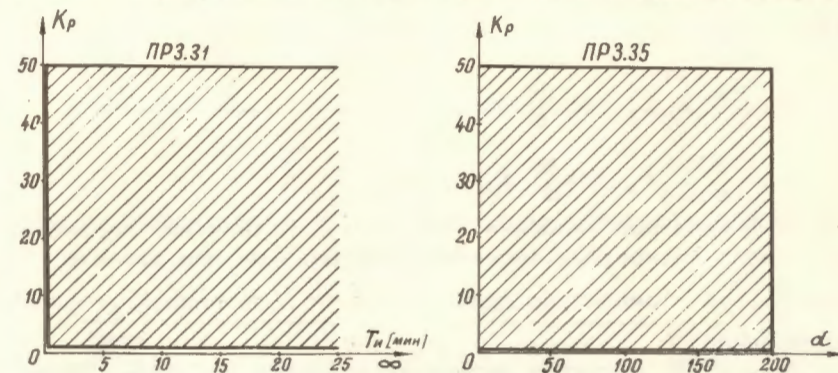


Рис. 1. Области настройки параметров применяемых типов регуляторов ПР3.31 и ПР3.35; $\alpha = T_{\text{пр}}/T_{\text{и}}$; $T_{\text{пр}}$ - время предвращения; $T_{\text{и}}$ - время интегрирования; $K_{\text{р}}$ - коэффициент усиления регулятора.

мых из условия заданного запаса устойчивости системы параметров настройки, в которой отношение T_p/T_i максимально ^{1/}.

Опираясь на приведенный критерий, зададимся целью выделить в областях настройки параметров точки или хотя бы небольшие области с координатами, отвечающими параметрам оптимальной настройки регуляторов.

В нашем случае наиболее простым представляется расчет оптимальных параметров настройки регуляторов графо-аналитическим способом по частотным характеристикам объекта регулирования, так как аналитическое выражение частотных характеристик неизвестно. Для этой цели экспериментально снятые динамические характеристики ^{2/} необходимо перестроить в частотные.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

При переводе экспериментальных динамических характеристик в частотные используем известную методику ^{1/}, согласно которой амплитуда $A(\omega)$ и фаза $\phi(\omega)$ частотной характеристики определяются:

$$A(\omega) = \frac{\pi}{4d} \cdot \sqrt{a_1^2 + b_1^2},$$

$$\phi(\omega) = \arctg \frac{b_1}{a_1},$$

где:

$$a_1 = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} Z_k \cdot \sin \frac{2\pi}{m} \cdot k,$$

$$b_1 = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} Z_k \cdot \cos \frac{2\pi}{m} \cdot k,$$

Z_k - дискретные значения $Z(t)$ /текущее значение параметра/;
 m - число дискретных значений, учитываемых при расчете;

$\omega = \frac{2\pi}{T_0}$; d - амплитуда прямоугольного колебания; T_0 - период колебаний.

Результаты расчетов амплитудно-фазовых частотных /АФЧ/- характеристик сведены в табл. 1-4.

Таблица 1

Значения параметров АФЧ-характеристики температуры стекла

$$\omega_0 = 2\pi/T_0$$

Номер точки	T_0 (с)	ω_0 (1/с)	$A(\omega)$	$\phi(\omega)$ (град.)
1	1800	0,0035	0,187	- 72°
2	1200	0,00523	0,13	- 132°
3	900	0,007	0,13	- 180°17'
4	600	0,0105	0,108	- 236°20'

Таблица 2

Значения параметров АФЧ-характеристики давления рабочего тела

Номер точки	T_0 (с)	ω_0 (1/с)	$A(\omega)$	$\phi(\omega)$ (град.)
1	600	0,0105	1,64	- 70°
2	480	0,013	1,35	- 84°
3	360	0,0175	1,17	- 98°
4	240	0,026	0,775	- 123°
5	120	0,052	0,29	- 158°
6	60	0,105	0,23	- 225°

Таблица 3

Значения параметров АФЧ-характеристики температуры рабочего тела

Номер точки	T_0 (с)	ω_0 (1/с)	$A(\omega)$	$\phi(\omega)$ (град.)
1	960	0,0065	0,12	- 99°
2	720	0,0087	0,092	- 109°
3	480	0,013	0,076	- 163°
4	240	0,026	0,036	- 180°

Таблица 4

Значения параметров АФЧ-характеристики параметра - γ , характеризующего режим теплообменника

Номер точки	T_0 (с)	ω_0 (1/с)	$\Lambda(\omega)$	$\varphi(\omega)$ (град.)
1	960	0,0065	12	- 47°
2	720	0,0087	1,03	- 89°
3	480	0,013	0,78	- 102°
4	240	0,026	0,4	- 189°

2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ ОДНОКОНТУРНЫХ СИСТЕМ

Структурная схема одноконтурной системы регулирования температуры стекла и давления рабочего тела в камере показана на рис. 2. Для оценки устойчивости систем воспользуемся критерием Найквиста, наиболее удобным для нашего случая^{1/}. АФЧ-характеристика разомкнутой одноконтурной схемы с ПИ-регулятором определяется выражением:

$$W_1(j\omega)_{\text{ПИ}} = K_p \cdot W_\mu(j\omega) - j \frac{W_\mu(j\omega)}{T_i \cdot \omega},$$

а ПИД-регулятором - выражением:

$$W_1(j\omega)_{\text{ПИД}} = [K_p - j(\frac{1}{T_i \cdot \omega} - a \cdot K_p \cdot T_i \cdot \omega)] \cdot W_\mu(j\omega),$$

где: $W_1(j\omega)$ - АФЧ-характеристика разомкнутой системы; K_p - коэффициент передачи регулятора; T_i - время интегрирования регулятора; $W_\mu(j\omega)$ - АФЧ-характеристика объекта регулирования; $a = T_{\text{пр}}/T_i$; $T_{\text{пр}}$ - время предварения регулятора. Расчет производим согласно методике, изложенной В.Я.Роточем^{1/}.

Вначале рассчитываем параметры оптимальной настройки контура, осуществляющего регулирование температуры стекла. Задаваясь T_i , получим семейство АФЧ-характеристик разомкнутого контура регулирования /рис. 3/. Используя данное семейство характеристик, произведем графо-аналитический расчет параметров оптимальной настройки регулятора, принимая $M=2$. По результатам расчета строим график зависимости $K_{\text{р.пр.}} = f(T_i)$ /рис. 4/ и определяем параметры оптимальной настройки регулятора $K_{\text{р.опт.}}$, $T_{\text{и.опт.}}$ /табл. 6/.

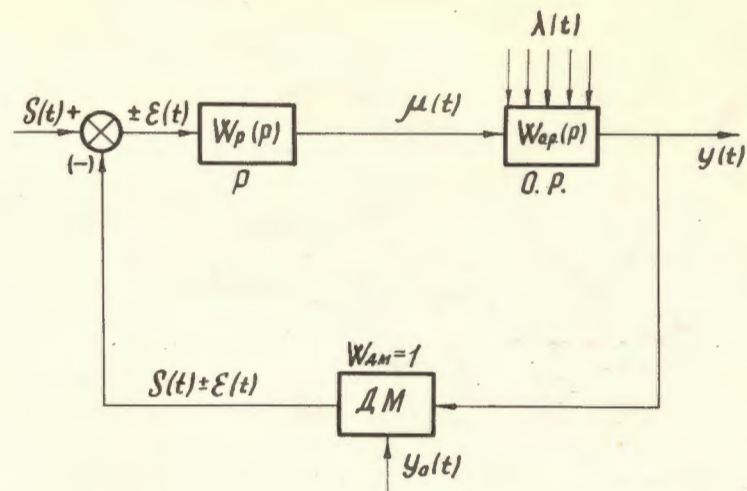


Рис. 2. Структурная схема одноконтурной системы регулирования: 0.Р. - объект регулирования; Р - регулятор; ДМ - дифманометр; $\mu(t)$ - регулирующее воздействие; $S(t)$ - задание регулятору; $y_0(t)$ - опорное давление дифманометра; $\lambda(t)$ - возмущающие воздействия; $y(t)$ - основная регулируемая величина; $\epsilon(t)$ - ошибка регулирования; $W_p(p)$ - передаточная функция регулятора; $W_{o.p.}(p)$ - передаточная функция объекта регулирования по регулирующему воздействию для основной регулируемой величины.

Особенностью расчета контура, осуществляющего регулирование давления рабочего тела, является то, что к одной и той же характеристике разомкнутой системы с ПИД-регулятором можно провести две окружности, касающиеся одновременно характеристики и луча ОЕ /рис. 5/, т.е. одной паре значений постоянной интегрирования (T_i) и (a) соответствуют два предельных значения коэффициента передачи регулятора $K_{\text{р.пр.}}$.

Не приводя полного расчета, отметим, что было построено три семейства АФЧ-характеристик разомкнутого контура при $a = 0,2$; $a = 0,5$; $a = 1$. Была определена оптимальная величина a ($a_{\text{опт.}} \approx 0,5$), и дальнейший расчет производился для оптимального значения a . Задаваясь T_i , получим семейство АФЧ-характеристик разомкнутого контура регулирования - рис. 5.

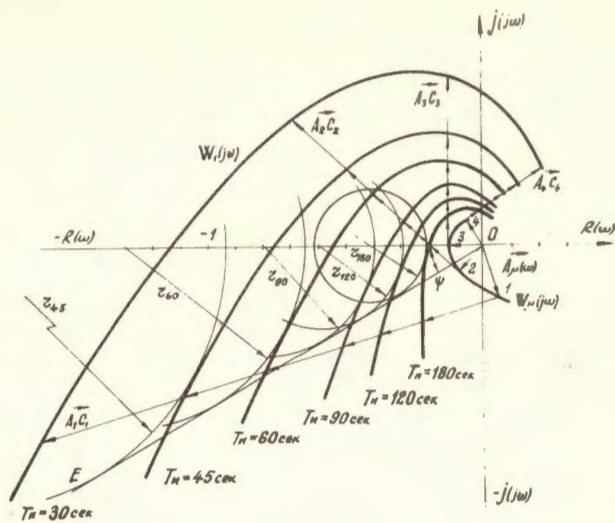


Рис. 3. Семейство АФЧ-характеристик разомкнутого контура, стабилизирующего температуру стекла: $\psi = \arcsin \frac{1}{M} = 30^\circ$ для $M=2$, r - радиус окружности, касающейся одновременно луча OE и АФЧ-характеристики разомкнутого контура для определенной величины $T_{И}$, центр которой находится на отрицательной вещественной полуоси /определяется подбором/;
 $|\vec{AC}| = \frac{A_{\mu}(\omega)}{T_{И} \cdot \omega}$, $\vec{A}_{\mu}(\omega)$ - вектор АФЧ-характеристики.

Используя семейство этих характеристик, графо-аналитическим способом произведем расчет параметров оптимальной настройки регулятора, принимая $M=1,6$. По результатам расчета построена область допустимых значений параметров настройки регулятора /рис. 6/, по которой определяем параметры оптимальной настройки /табл. 6/.

3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КАСКАДНО-ДУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ

Структурная схема каскадно-двухконтурной системы регулирования температуры рабочего тела приведена на рис. 7. В общем случае определение оптимальной настройки каскадных схем регулирования оказывается значительно более сложной

Рис. 4. График зависимости $K_{р.пр.} = f(T_{И})$, позволяющий определить параметры оптимальной настройки регулятора, стабилизирующего температуру стекла: $K_{р.пр.}$ - предельно-допустимое значение $K_{р.}$ для $M=2$; I - область запрещенных значений параметров настройки регулятора для $M=2$; II - граница областей; III - область допустимых значений параметров настройки регулятора для $M=2$.

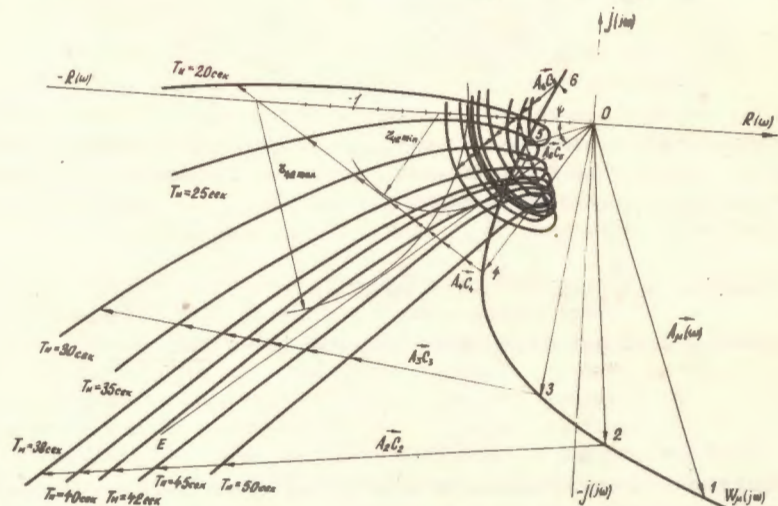
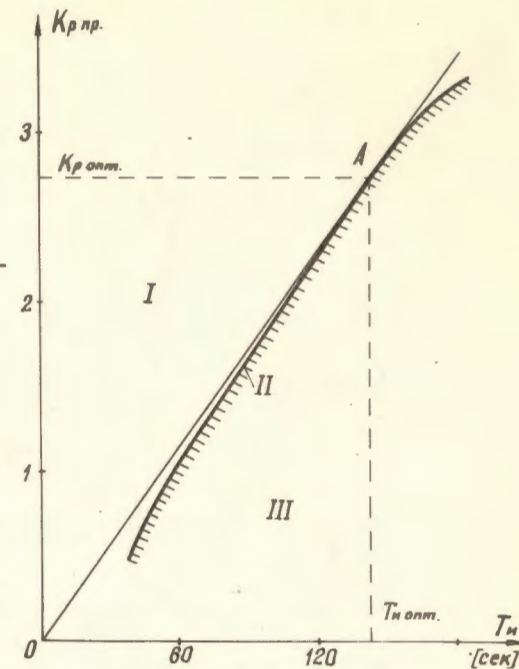


Рис. 5. Семейство АФЧ-характеристик разомкнутого контура с ПИД-регулятором, стабилизирующего давление рабочего тела
 $|\vec{AC}| = \left(\frac{1}{T_{И} \cdot \omega} - \alpha \cdot T_{И} \cdot \omega \right) \cdot |\vec{A}_{\mu}(\omega)|$; $\alpha = \frac{T_{пр.}}{T_{И}} = 0,5$;

$$\psi = \arcsin \frac{1}{M} = \arcsin \frac{1}{1,6} = 39^\circ.$$

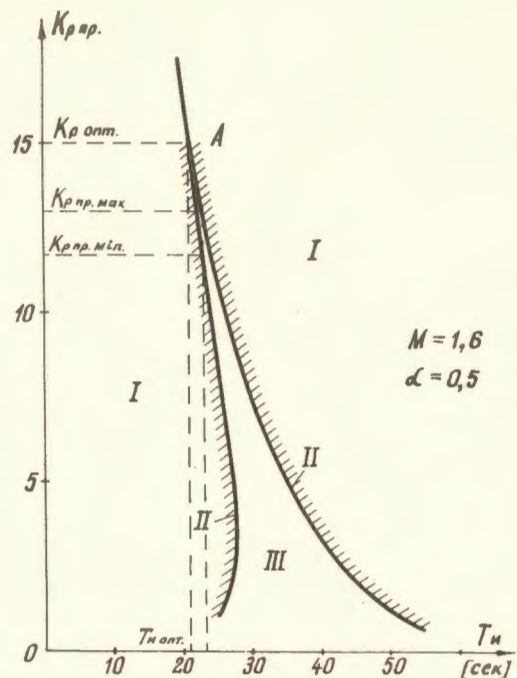


Рис. 6. График зависимости $K_{p.pr.} = f(T_{и})$, позволяющий определить параметры оптимальной настройки регулятора, стабилизирующего давление рабочего тела: $K_{p.pr.}$ - предельно-допустимое значение K_p для $M = 1,6$ и $\alpha = 0,5$

$$K_{p.pr. max} = \frac{M}{M^2 - 1} \cdot \frac{1}{r_{min}}; \quad K_{p.pr. min} = \frac{M}{M^2 - 1} \cdot \frac{1}{r_{max}}$$

Остальные обозначения такие же, как и на рис. 4.

операций, чем определение настройки одноконтурной схемы. В этих условиях достаточно надежное решение этой задачи возможно практически только при использовании модулирующих или вычислительных устройств. При этом область приближенных параметров настройки, в которой следует отыскивать их точные значения, находится предварительным приближенным расчетом. Методика таких расчетов базируется на предположении о возможности расчета какого-либо одного контура,

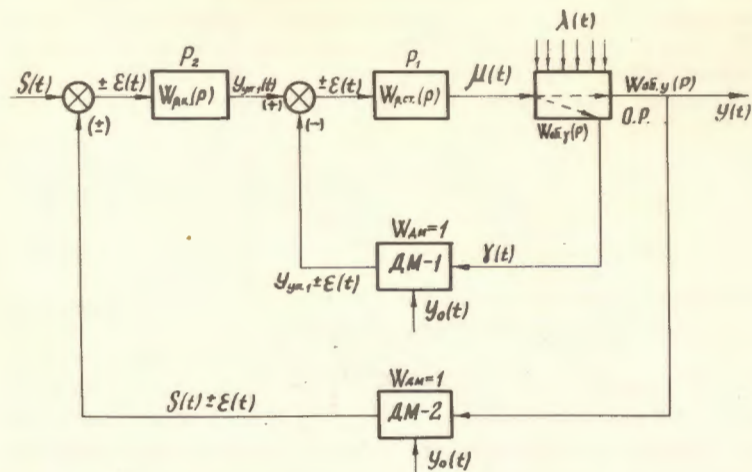


Рис. 7. Структурная схема каскадно-двухконтурной системы регулирования: P_1 - стабилизирующий регулятор; P_2 - корректирующий регулятор; $\gamma(t)$ - вспомогательный регулируемый параметр; $W_{p.k.}(P)$ - передаточная функция корректирующего регулятора; $W_{p.st.}(P)$ - передаточная функция стабилизирующего регулятора; $W_{об.γ}(P)$ - передаточная функция объекта по регулирующему воздействию для основной регулируемой величины; $W_{об.γ}(P)$ - передаточная функция объекта регулирования по регулирующему воздействию для вспомогательной регулируемой величины. Остальные обозначения такие же, как и на рис. 2.

независимо от другого. Имеется, однако, несколько случаев, когда указанный метод расчета двухконтурных схем путем выделения одного контура и расчета его настройки независимо от другого регулятора оказывается практически вполне оправданным, и полученная таким путем настройка схемы будет достаточно близкой к оптимальной^{3/}. Одному из таких случаев соответствует наша система: в процессе работы возможно на некоторое время отключение корректирующего регулятора, так что в работе остается только стабилизирующий регулятор.

По АФЧ-характеристике объекта - $W_{об.γ}(j\omega)$ /табл. 4/, которая связывает вспомогательную регулируемую величину с регулирующим воздействием, как и ранее, находим оптимальную настройку стабилизирующего регулятора. Результаты расчета приведены на рис. 8 и 9, а значения оптимальных параметров - в табл. 6.

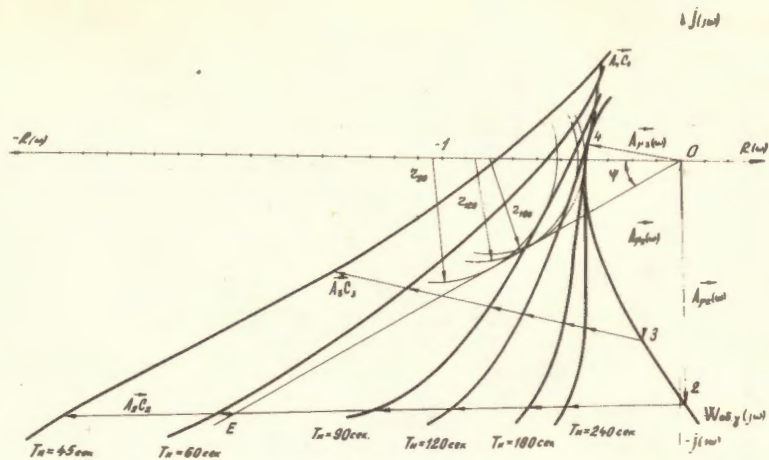


Рис. 8. Семейство АФЧ-характеристик разомкнутого контура регулятора - P_1 каскадно-двухконтурной схемы, стабилизирующей температуру рабочего тела. Обозначения такие же, как и на рис. 3.

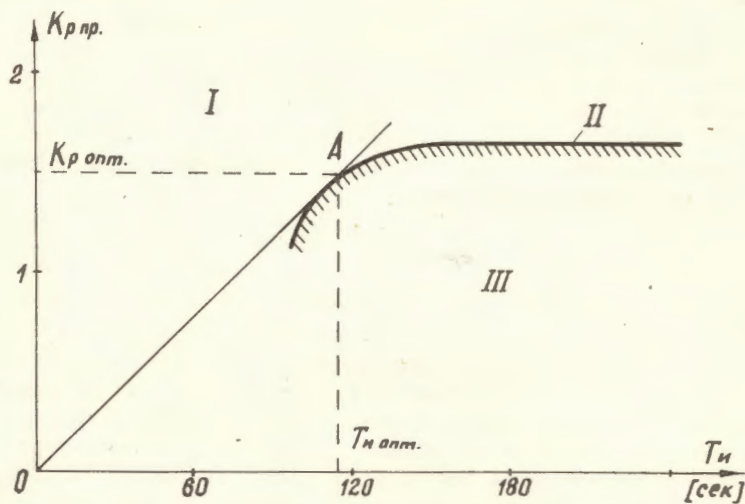


Рис. 9. График зависимости $K_{p.pr.} = f(T_n)$, позволяющий определить оптимальную настройку регулятора P_1 каскадно-двухконтурной схемы, стабилизирующей температуру рабочего тела. Обозначения такие же, как и на рис. 3.

Прежде чем приступить к определению настройки корректирующего регулятора, необходимо построить АФЧ-характеристику эквивалентного регулируемого объекта ($W_{об.э.к.}$). Используя структурную схему /рис. 7/, определяем выражение АФЧ-характеристики эквивалентного регулируемого объекта для P_2 :

$$\vec{W}_{об.э.к.}(j\omega) = \frac{\vec{W}_{об.у.}(j\omega) \cdot \vec{W}_{р.ст.}(j\omega)}{1 + \vec{W}_{об.у.}(j\omega) \cdot \vec{W}_{р.ст.}(j\omega)}$$

Результаты графо-аналитических расчетов по определению параметров АФЧ-характеристики эквивалентного регулируемого объекта приведены в табл. 5.

После построения АФЧ-характеристики эквивалентного регулируемого объекта $W_{об.э.к.}(j\omega)$ определение оптимальной настройки регулятора P_2 производится, как и ранее. Результаты расчетов приведены на рис. 10, 11 и в табл. 6.

Таблица 5

Значения параметров АФЧ-характеристики эквивалентного регулируемого объекта для корректирующего регулятора

Параметр	Номер точки	2	3	4
$ \vec{W}_{об.у.}(j\omega) \cdot \vec{W}_{р.ст.}(j\omega) $		0,19	0,13	0,06
$\varphi_{\vec{W}_{об.у.}(j\omega) \cdot \vec{W}_{р.ст.}(j\omega)}$ [град]		-158°	-187°	-203°
$ 1 + \vec{W}_{об.у.}(j\omega) \cdot \vec{W}_{р.ст.}(j\omega) $		1,57	1,07	0,5
$\varphi(1 + \vec{W}_{об.у.}(j\omega) \cdot \vec{W}_{р.ст.}(j\omega))$		-91°	-76°	+29°
$\frac{ \vec{W}_{об.у.}(j\omega) \cdot \vec{W}_{р.ст.}(j\omega) }{ 1 + \vec{W}_{об.у.}(j\omega) \cdot \vec{W}_{р.ст.}(j\omega) } = W_{об.э.к.} $		0,12	0,12	0,12
$\varphi_{\vec{W}_{об.у.}(j\omega) \cdot \vec{W}_{р.ст.}(j\omega)} - \varphi_{1 + \vec{W}_{об.у.}(j\omega) \cdot \vec{W}_{р.ст.}(j\omega)} = \varphi_{W_{об.э.к.}}$		-67°	-111°	-232°

Таблица 6

Контур регулирования	Значение оптимального параметра		
	$K_{p. опт.}$	$T_{и. опт.} (с)$	$T_{пр. опт.} (с)$
Регулирование температуры стекла	2,74	142	-
Регулирование давления рабочего тела камеры	14	22	II
Регулирование температуры рабочего тела:			
а) стабилизирующий регулятор;	1,5	115	-
б) корректирующий регулятор	1,25	19	-

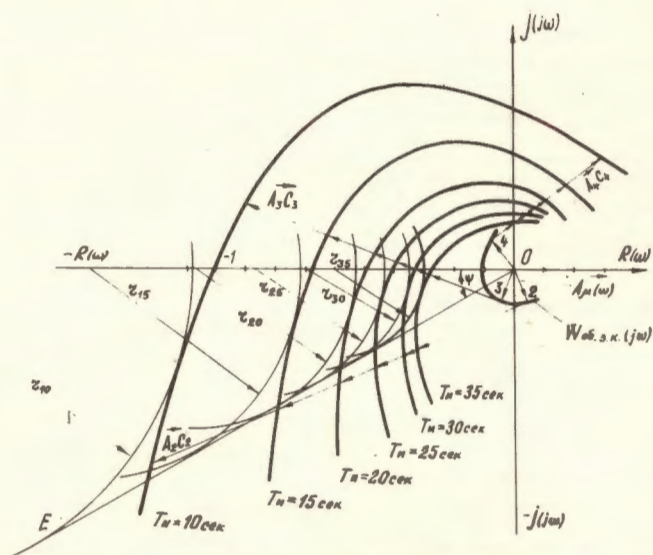


Рис. 10. Семейство АФ4-характеристик разомкнутого контура эквивалентного регулируемого объекта и регулятора P_2 каскадно-двухконтурной схемы, стабилизирующей температуру рабочего тела. Обозначения такие же, как и на рис. 3.

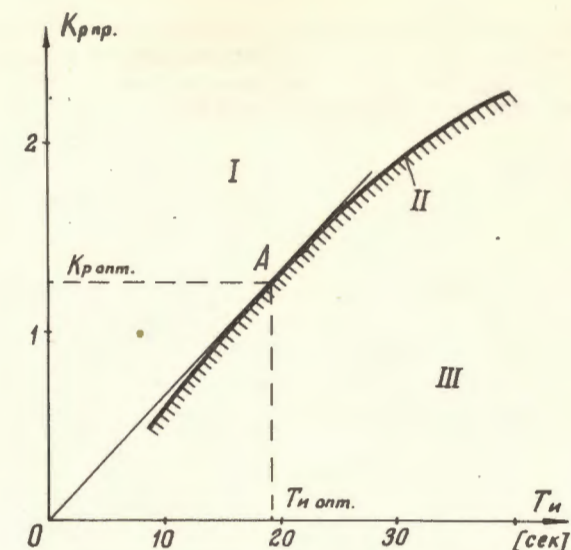


Рис. 11. График зависимости $K_{р.пр.} = f(T_{и})$ позволяющий определить параметры оптимальной настройки регулятора P_2 каскадно-двухконтурной схемы, стабилизирующей температуру рабочего тела: $K_{р.пр.}$ - предельно-допустимое значение $K_{р.}$ для $M = 2$. Остальные обозначения такие же, как и на рис. 4.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ, ВЫВОДЫ

В табл. 6 систематизированы результаты расчетов параметров оптимальной настройки регуляторов. Расчетные оптимальные параметры были установлены на регуляторах в ходе рабочего сеанса установки "Людмила". На рис. 12-14 изображены записи процессов регулирования при расчетных параметрах настройки регуляторов. По ним можно судить, что качество процессов регулирования удовлетворяет начальным требованиям ^{4/}.

Практика работы на пузырьковой камере "Людмила" показала, что применение системы автоматического регулирования рабочих параметров целесообразно и вполне оправдывает себя:

а/ значительно облегчается работа обслуживающего персонала установки, практически высвобождается оператор, осуществляющий ручную регулировку рабочих параметров;

б/ качество автоматического регулирования существенно превышает качество ручного, что обеспечивает увеличение выхода качественной फिल्मовой информации на $10 \div 20\%$ и тем самым дает большой экономический эффект.

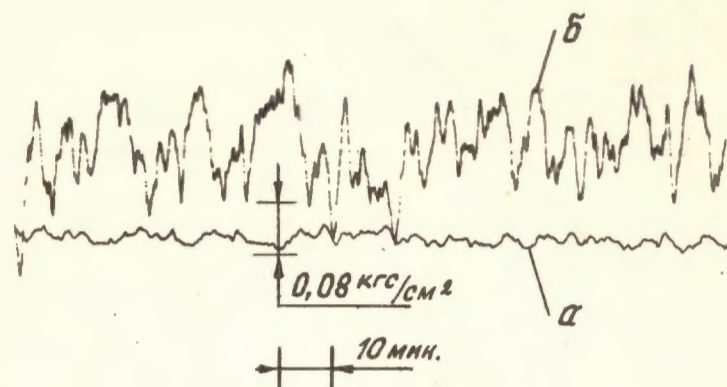


Рис. 12. Запись процесса регулирования температуры стекла камеры при одноконтурной схеме включения регулятора и оптимальных параметрах настройки: $K=2,74; T_{и}=142$ с. а - регулируемый параметр; б - давление /выходное/ регулятора.

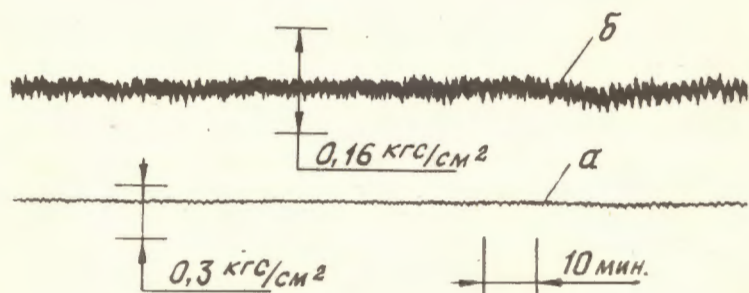


Рис. 13. Запись процесса регулирования давления в камере при одноконтурной схеме включения регулятора и оптимальных параметрах настройки: $K=14; T_{и}=22$ с; $T_{пр.}=11$ с, а - запись процесса через манометр МСП-2; б - запись процесса через дифманометр.

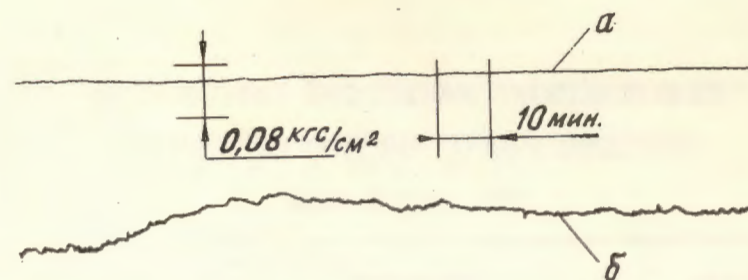


Рис. 14. Запись процесса регулирования температуры рабочей жидкости в камере при каскадно-двухконтурной схеме включения регуляторов и оптимальных параметрах настройки: $P_1 - K=1,5; T_{и}=115$ с; $P_2 - K=1,25; T_{и}=19$ с. а - регулируемый параметр; б - выход регулятора P_2 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Ротач В.Л. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. "Энергия", М., 1973.
2. Киреев В.И., Толмачев В.Т., Хренов Ю.В. ОИЯИ, 13-12421, Дубна, 1979.
3. Ротач В.Л. Расчет настройки промышленных систем регулирования. Госэнергоиздат, М., 1961.
4. Толмачев В.Т., Хренов Ю.В. ОИЯИ, 13-9166, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 мая 1979 года.