

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна

Кафедра автоматизации производственных процессов

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ХИМИКО -
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Методические указания
к выполнению контрольной работы для студентов заочной формы обучения
по направлению подготовки 18.03.01 «Химическая технология»

Составитель
Д. А. Шурыгин

Санкт-Петербург
2022

ВВЕДЕНИЕ

Среди разнообразных задач, которые ставятся перед студентами химико-технологических специальностей при изучении ими дисциплины «Системы управления и автоматизация химико-технологических процессов», наиболее важными являются следующие:

1. Анализ производственных процессов (в сфере своей специализации) как объектов автоматизации.
2. Выполнение несложных динамических расчетов системы автоматического регулирования конкретного технологического параметра с использованием при этом современной компьютерной техники.

Цель курсовой работы – закрепление студентами знаний и приобретение ими необходимых практических навыков.

В методических указаниях дается описание курсовой работы и приводится список индивидуальных заданий (данных), необходимых для ее выполнения.

ЗАДАНИЯ ПО ДИНАМИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Приведены два типа систем автоматического регулирования параметров, играющих важную роль в технологических процессах. По каждому типу разработано 12 вариантов заданий (2 резервных), отличающихся числовыми данными. Номер варианта задания определяется последней цифрой номера зачетной книжки студента (если 0, то вариант 10), а номер типа системы – предпоследней цифрой номера зачетной книжки (если от 1 до 5, то тип 1, приведенный на рис. 2, а если от 6 до 0, то тип 2, приведенный на рис. 3).

В объем работы входит построение области устойчивости системы и определение места расположения рабочей точки, позволяющие осуществить выбор параметров системы, при которых обеспечивается требуемое качество регулирования. Необходимо также выполнить построение переходного процесса в системе с применением ЭВМ,

Методика выполнения динамического расчета подробно изложена в методических указаниях «Расчет динамики систем автоматического регулирования», составители В.Я. Энтин, Д.А. Шурыгин, Санкт-Петербург 2018.

В расчетно-пояснительных записках должны быть приведены схемы, содержащиеся в данных указаниях при описании конкретных схем автоматического регулирования (САР).

Перед описанием САР необходимо сделать следующее замечание. Для математического описания процессов, происходящих в системе, удобно уравнения всех входящих в нее элементов приводить в отклонениях от установившегося режима, когда выходной сигнал, например, регулируемого объекта, сохраняется постоянным и равным заданному значению. При этом сохраняются постоянными и все другие величины в системе, в том числе входные и выходные координаты звеньев. Ниже при описании САР на примерах объектов регулирования показано, как

получены уравнения в отклонениях. Для других звеньев уравнения сразу приводятся в отклонениях.

Типовая структурная схема САР,
 ный на рис. 1.

имеет вид, показан-

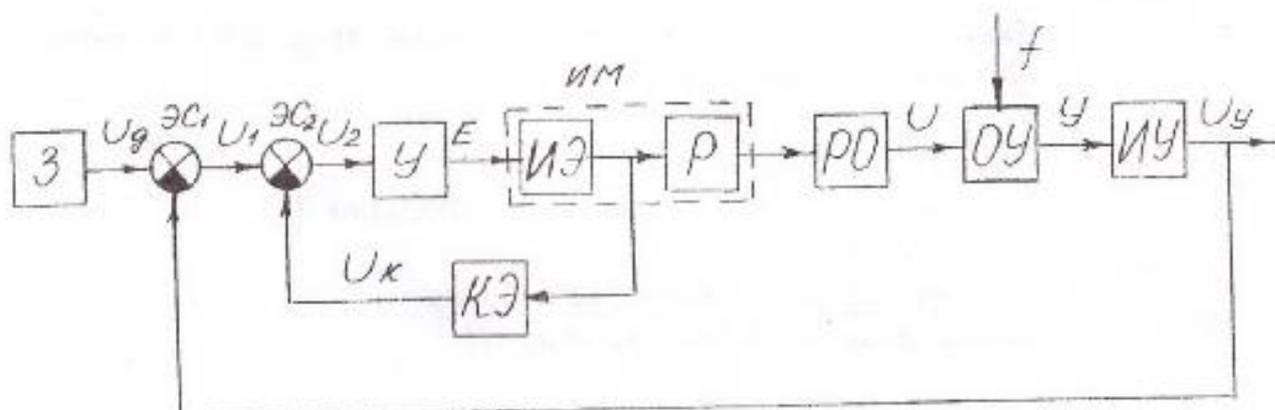


Рис. 1. Структурная схема САР:

З - задатчик; У - усилитель; КЭ - корректирующий элемент; Р - редуктор;
 ЭС1 и ЭС2 - элементы сравнения; РО - регулирующий орган;
 ИЭ - исполнительный элемент (двигатель); ОУ - объект управления;
 ИУ - измерительное устройство

Такую структуру имеют и системы автоматического регулирования кон-
 кретных технологических параметров, приведенных ниже в заданиях 1 и 2.

Задание 1

Система автоматического регулирования температуры красильного раствора в плюсовке красильной машины (рис. 2, табл. 2)

При непрерывном крашении тканей температура красильного раствора в
 плюсовке должна быть постоянной. Для разных красителей эта температура
 должна быть различна, так при использовании прямых красителей она состав-
 ляет обычно 75 – 80 °С, а для некоторых активных красителей – 25 – 30 °С.

Для подогрева красильного раствора в плюсовке используют глухой пар,
 т.е. пропускаемый через змеевик (теплообменник), размещенный в плюсовке
 (рис.2).

Обозначения переменных на рис.2 аналогичны обозначениям, использо-
 ванным в [2]. Выведем уравнение объекта регулирования.

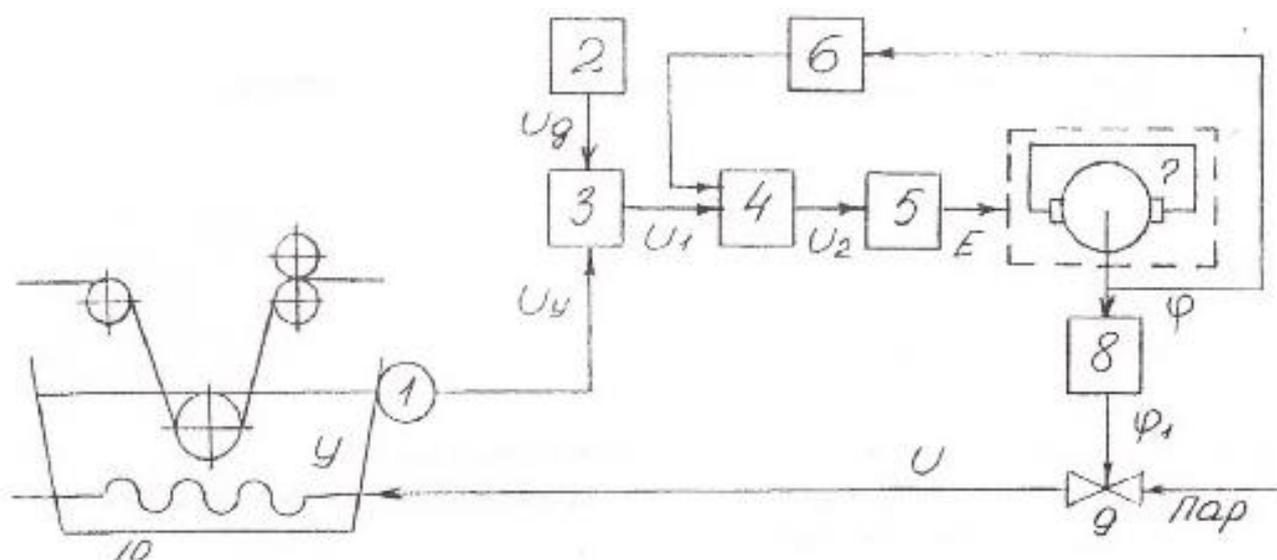


Рис.2. САР температуры красильного раствора:

- 1 – измерительный элемент; 2 – задатчик; 3 и 4 – элементы сравнения; 5 – усилитель; 6 – корректирующий элемент; 7 – исполнительный элемент; 8 – редуктор; 9 – регулирующий орган; 10 – объект управления

В системе объектом регулирования является емкость с осадительным раствором. С помощью САР температура раствора поддерживается с определенной точностью на постоянном уровне, соответствующем нормальному протеканию технологического процесса. Уравнение динамики регулируемого объекта, связывающее температуру раствора Θ_p , количество тепла Q , подводимого к емкости, и температуру окружающего воздуха Θ_n , может быть получено на основе уравнения теплового баланса. В целях упрощения будем считать, что подводимое к объекту в единицу времени тепло расходуется только на его нагрев и передачу тепла в окружающую среду. Расходом тепла на испарение раствора будем пренебрегать.

Уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$(m_p C_p + m_n C_n) d\Theta_p + kS(\Theta_p - \Theta_n) dt = Q dt$$

или

$$(m_p C_p + m_n C_n) d\Theta_p / dt + kS(\Theta_p - \Theta_n) = Q, \quad (1)$$

где m_p и C_p – соответственно масса, кг, и удельная теплоемкость раствора, Дж/(кг·К);

m_n и C_n – соответственно масса и удельная теплоемкость стенок емкости;

S – поверхность, с которой происходит передача тепла в окружающую среду, м²;

k – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Уравнение регулируемого объекта в установившемся режиме, когда

$$d\Theta_p / dt = 0,$$

имеет следующий вид:

$$kS(\Theta_{p0} - \Theta_{в0}) = Q_0, \quad (2)$$

где Θ_{p0} – температура раствора в установившемся режиме;

$\Theta_{в0}$ – температура окружающего воздуха для рассматриваемого установившегося режима работы;

Q_0 – количество тепла, подводимого паром в единицу времени в установившемся режиме.

Предположим, что температура окружающей среды изменилась на величину f , т.е. возникло возмущающее воздействие. Это приводит к нарушению теплового баланса установившегося режима, который описывается уравнением (2). Система автоматического регулирования реагирует на возмущающее воздействие (точнее, на вызванные им отклонения температуры раствора) изменением подачи тепла в объект, причем подача тепла изменяется таким образом, чтобы температура раствора восстановилась. Вся система после некоторого переходного процесса вновь придет в установившейся режим, который может отличаться значениями температуры Θ_p и количества тепла Q от установившегося режима (назовем его исходным установившемся режимом), имевшего место при отсутствии возмущения. Рассмотрим поведение объекта, вызванное возмущающим воздействием f . Для этого запишем уравнение объекта в отклонениях от исходного установившегося режима. Будем считать, что в исходном установившемся режиме температура раствора равна заданной, т.е. $\Theta_{p0} = \Theta_z$.

Введем следующие обозначения:

y – отклонение температуры раствора от ее значения $\Theta_{p0} = \Theta_z$ в исходном установившемся режиме работы;

U – отклонение количества тепла, подводимого к объекту, от количества тепла Q_0 в исходном установившемся режиме.

Тогда уравнение (1) имеет следующий вид:

$$(m_p C_p + m_n C_n) d(\Theta_{p0} + y) / dt + kS[(\Theta_{p0} + y) - (\Theta_{в0} + f)] = (Q_0 - U).$$

Знак "-" перед U означает, что отклонение подачи тепла от установившегося значения направлено в сторону, противоположную отклонению температуры раствора. Это уравнение может быть преобразовано к следующему виду:

$$(m_p C_p + m_n C_n) dy/dt + kS(\Theta_{p0} - \Theta_{n0}) - kS(y - f) = Q_0 - U. \quad (3)$$

Вычитая из уравнения (3) уравнение (2), получаем следующее уравнение объекта в отклонениях:

$$(m_p C_p + m_n C_n) dy/dt + kS(y - f) = -U$$

или

$$(m_p C_p + m_n C_n) dy/dt + kSy = kSf - U.$$

Это уравнение удобно записать в виде

$$T_o dy/dt + y = f - k_o U, \quad (4)$$

где $T_o = \frac{(m_p C_p + m_n C_n)}{kS}$ – постоянная времени объекта,

$k_o = 1/kS$ – коэффициент передачи объекта,

или в операторной форме

$$(T_o p + 1)y = f - k_o U. \quad (5)$$

Уравнение (4) составлено на основе упрощающих допущений. Упрощения состоят в том, что, как уже сказано, не учитывается расход тепла на испарение раствора, температура раствора во всем объеме емкости принимается одинаковой, распределение температуры по толщине стенок емкости принимается линейным. Указанные допущения, однако, несущественно искажают структуру уравнения теплового баланса. Уравнения остальных звеньев САР приведены в [2], иначе выглядят лишь уравнение исполнительного элемента (ИЭ) и корректирующего элемента (КЭ); уравнение ИЭ: $(T_{иp} + 1)p\varphi = k_g E$, уравнение КЭ: $U_k = k_k \varphi$.

Исходные данные к заданию 1 содержатся в табл.2. Буквенные обозначения исходных данных соответствуют принятым в [5].

Знаком “?” в табл.2 отмечены параметры настройки регулятора, определяемые местом расположения рабочей точки. Общими для всех вариантов являются следующие данные объекта регулирования:

$k=120 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; $S=2 \text{ м}^2$; $m_n=25 \text{ кг}$; $C_n=500 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; $C_p=4200 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

При оценке статической точности системы принять $f_0' = 0$ и $U_{g0} = 1(t)$, а при расчете переходного процесса $f' = -1(t)$ и $U_g = 0$.

Исходные данные к заданию 1

№ вар.	Δ , б/р	m , б/р	m_p , кг	k_g , рад/с·В	k_r , б/р	k_{po} , Вт/рад	$k_{и}$, В/К	k_k , В/рад	k_y , б/р	$T_{в}$, с
1	0,05	0,2	30	0,3	0,1	10000	0,07	?	?	1,0
2	0,04	0,3	30	0,25	0,12	11000	0,05	?	?	0,9
3	0,03	0,4	30	0,2	0,1	12000	0,06	?	?	0,5
4	0,05	0,5	28	0,3	0,12	10000	0,05	?	?	0,6
5	0,04	0,2	28	0,25	0,1	11000	0,06	?	?	0,8
6	0,03	0,3	28	0,2	0,12	12000	0,07	?	?	0,7
7	0,05	0,4	26	0,3	0,1	10000	0,07	?	?	1,0
8	0,04	0,5	26	0,25	0,12	11000	0,05	?	?	0,9
9	0,03	0,2	26	0,2	0,1	12000	0,06	?	?	0,5
10	0,05	0,3	32	0,3	0,12	10000	0,06	?	?	0,6
11	0,04	0,4	32	0,25	0,1	11000	0,07	?	?	0,8
12	0,03	0,5	32	0,2	0,12	12000	0,05	?	?	0,7

Задание 2

**Система автоматического регулирования уровня раствора в емкости
(рис.3, табл.3)**

При различного рода мокрых обработках тканей (крашении, белении, мерсеризации и т.п.) уровень раствора в емкости (плосовке), где происходит пропитывание ткани, должен поддерживаться неизменным. Унос раствора тканью, приводящий к понижению уровня, компенсируется доливом раствора из бака хранения.

Изменения интенсивности уноса раствора, зависящего от скорости движения ткани, ее начальной влажности и степени отжима на выходе из плосовки, а также изменения уровня раствора в баке хранения могут рассматриваться как возмущения. Для поддержания заданного уровня раствора применяется система автоматического регулирования (САР), рис.3.

Обозначения, примененные на рис.3, аналогичны обозначениям, использованным в [5].

Выведем уравнение объекта регулирования. В данном задании для упрощения математического описания объекта унос раствора тканью заменен стоком раствора интенсивностью $Q_{ст}$ через клапан с сечением F_2 . Для стабилизации h_1 сток раствора компенсируется его притоком с интенсивностью $Q_{пр}$ через клапан с сечением F_1 .

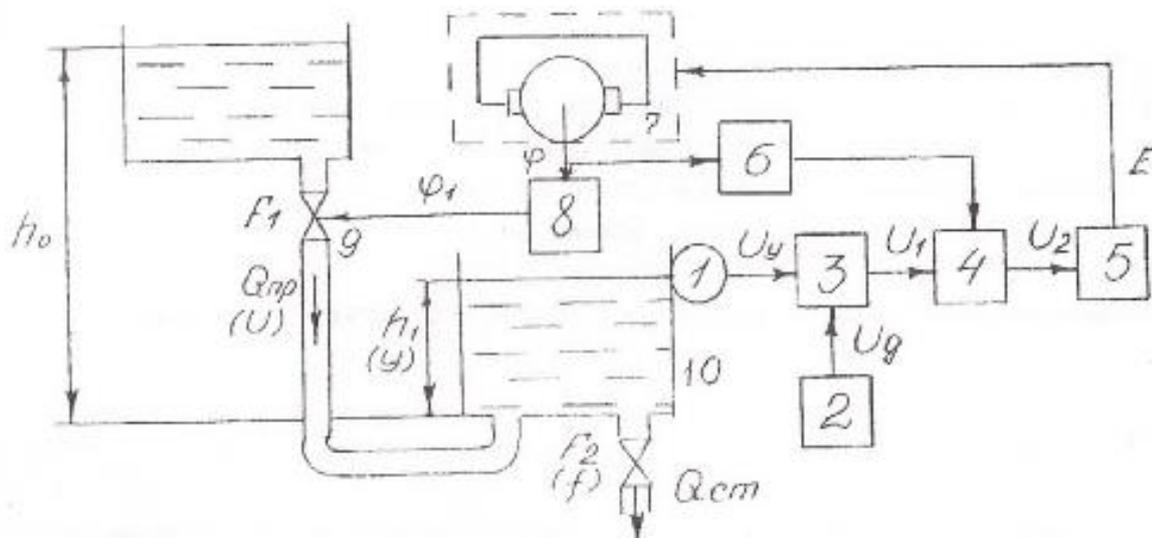


Рис.3. САУ уровня раствора:

1 – измерительное устройство, 2 – задатчик, 3 и 4 – элементы сравнения, 5 – усилитель, 6 – корректирующий элемент, 7 – исполнительный элемент, 8 – редуктор, 9 – регулирующий орган и 10 – объект управления

Уравнение динамики регулируемого объекта, связывающее уровень раствора h_1 , его приток в объект $Q_{пр}$ и сток из объекта $Q_{ст}$, имеет следующий вид:

$$Sdh_1 / dt = Q_{пр} - Q_{ст}, \quad / (6)$$

где S – площадь поперечного сечения емкости (площадь “зеркала” жидкости), m^2 ;

h_1 – уровень раствора, m ;

$Q_{пр}$, $Q_{ст}$ – объемный приток и сток соответственно, m^3/c .

Уравнение регулируемого объекта в установившемся режиме, когда

$$dh_1 / dt = 0,$$

имеет вид

$$Q_{пр}^0 = Q_{ст}^0, \quad (7)$$

где $Q_{пр}^0$ и $Q_{ст}^0$ – объемный приток и сток в установившемся режиме.

Предположим, сток раствора изменился вследствие изменения проходного сечения клапана F_2 , т.е. возникло возмущающее воздействие. Это приводит к нарушению баланса, установившегося режима, описанного уравнением (7).

Система автоматического регулирования реагирует на возмущающее воздействие (точнее, на вызванное им отклонение уровня раствора h_1) изменением притока раствора таким образом, чтобы уровень раствора восстанавливался.

Вся система после некоторого переходного процесса вновь придет в установившийся режим, который может отличаться значениями уровня h_1 и притока раствора $Q_{\text{пр}}$ от установившегося режима (назовем его исходным установившимся режимом), имевшего место при отсутствии возмущения.

Дополним уравнение объекта (6) уравнениями, характеризующими переменные $Q_{\text{пр}}$ и $Q_{\text{ст}}$.

Уравнение расхода при истечении жидкости из емкости в атмосферу имеет вид

$$Q_{\text{ст}} = F_2 \varepsilon_2 \sqrt{2gh_1}, \quad (8)$$

где ε_2 – коэффициент расхода, учитывающий особенности формы проходного сечения вентиля, безразмерный;

$g=9.81$ – ускорение силы тяжести, м/с^2 .

Уравнение расхода при истечении жидкости из емкости в емкость (“под уровень”) имеет вид

$$Q_{\text{пр}} = F_1 \varepsilon_1 \sqrt{2g(h_0 - h_1)}, \quad (9)$$

где ε_1 – имеет тот же смысл, что и в формуле (8);

$(h_0 - h_1)$ – перепад уровней в емкостях, м.

Подставив уравнения (8) и (9) в (6), получим уравнение объекта в виде

$$Sdh_1/dt = F_1 \varepsilon_1 \sqrt{2g(h_0 - h_1)} - F_2 \varepsilon_2 \sqrt{2gh_1}. \quad (10)$$

Это уравнение нелинейно относительно переменных h_1, h_0, F_1, F_2 .

Запишем уравнение объекта в отклонениях от исходного установившегося режима. Будем считать, что в исходном установившемся режиме уровень раствора равен заданному $h_1^0 = h_s$, а значение h_0 остается неизменным.

Введем следующие обозначения:

y – отклонения уровня раствора от его значения $h_1^0 = h_s$ в исходном установившемся режиме работы;

U – отклонение проходного сечения клапана F_1 от его значения F_1^0 в исходном установившемся режиме;

f – изменение сечения клапана F_2 по сравнению с его значением F_2^0 в исходном установившемся режиме, т.е. возмущающее воздействие.

Запись уравнения в отклонениях позволяет получить линеаризованное уравнение объекта регулирования. Это уравнение имеет вид

$$S dy/dt = \varepsilon_1 \sqrt{2g(h_0 - h_1^0)} U - \left(\frac{F_2^0 \varepsilon_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{h_1^0}} + \frac{F_1^0 \varepsilon_1 \sqrt{2g}}{2\sqrt{(h_0 - h_1^0)}} \right) y - \varepsilon_2 \sqrt{2gh_1^0} f. \quad (11)$$

Значения F_1^0 и F_2^0 определим из уравнений (8) и (9):

$$F_2^0 = \frac{Q_{ст}^0}{\varepsilon_2 \sqrt{2g h_1^0}}; \quad F_1^0 = \frac{Q_{пр}^0}{\varepsilon_1 \sqrt{2g(h_0 - h_1^0)}}. \quad (12)$$

При этом $Q_{ст}^0 = Q_{пр}^0 = Q^0$.

Подставив (12) в (11) и используя обозначения Q^0 , получим

$$S dy/dt + \left(\frac{Q^0}{2h_1^0} + \frac{Q^0}{2(h_0 - h_1^0)} \right) y = \varepsilon_1 \sqrt{2g(h_0 - h_1^0)} U - \varepsilon_2 \sqrt{2g h_1^0} f. \quad (13)$$

Это уравнение удобно записать в следующем виде:

$$T_0 dy/dt + y = k_0 U + k_f f, \quad (14)$$

где $T_0 = \frac{2Sh_1^0(h_0 - h_1^0)}{Q^0}$ — постоянная времени объекта, с;

$k_0 = \frac{\varepsilon_1 2h_1^0}{Q^0} (h_0 - h_1^0) \sqrt{2g(h_0 - h_1^0)}$ — коэффициент передачи объекта по регулирующему воздействию, m^{-1} ;

$k_f = \frac{\varepsilon_2 2h_1^0}{Q^0} (h_0 - h_1^0) \sqrt{2gh_1^0}$ — коэффициент передачи объекта по возмущающему воздействию, m^{-1} .

Уравнение (9) можно записать в операторной форме:

$$(T_0 + 1)y = k_0 U + k_f f. \quad (15)$$

Уравнения остальных звеньев САР приведены в [5], иначе выглядят лишь уравнения исполнительного элемента (ИЭ) и корректирующего элемента (КЭ); уравнение ИЭ: $(T_{пр} + 1)r\varphi = k_g E$, уравнение КЭ: $U_k = k_x \varphi$.

Исходные данные к заданию 2 содержатся в табл.3. Буквенные обозначения исходных данных соответствуют принятым в [5].

Таблица 3

Исходные данные к заданию 2

№ вар.	Δ , б/р	m , б/р	S , м ²	$h^0_{1,}$ м	k_g , рад/с·В	k_p , б/р	k_{po} , м ² /рад	$k_{нв}$, В/м	$k_{к}$, В/рад	$k_{у}$, б/р	$T_{нв}$, с
1	0,05	0,2	1,0	0,3	0,3	0,1	0,01	0,07	?	?	1,0
2	0,04	0,3	1,1	0,35	0,25	0,12	0,008	0,05	?	?	0,9
3	0,03	0,4	1,2	0,4	0,2	0,08	0,006	0,06	?	?	0,5
4	0,05	0,5	1,3	0,5	0,3	0,1	0,01	0,05	?	?	0,4
5	0,04	0,2	1,3	0,3	0,25	0,08	0,008	0,06	?	?	0,2
6	0,03	0,3	1,2	0,35	0,2	0,12	0,006	0,07	?	?	0,6
7	0,05	0,4	1,1	0,4	0,3	0,12	0,01	0,07	?	?	1,0
8	0,04	0,5	1,0	0,5	0,25	0,1	0,008	0,06	?	?	0,9
9	0,03	0,2	1,0	0,3	0,2	0,08	0,006	0,05	?	?	0,5
10	0,05	0,3	1,1	0,35	0,3	0,12	0,01	0,06	?	?	0,4
11	0,04	0,4	1,2	0,4	0,25	0,08	0,008	0,07	?	?	0,2
12	0,03	0,5	1,3	0,5	0,2	0,1	0,006	0,05	?	?	0,6

Знаком “?” в табл.3 отмечены параметры настройки регулятора, определяемые местом расположения рабочей точки. Общими для всех вариантов являются следующие данные объекта регулирования:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.6; h_0 = 6 \text{ м}; Q^0 = 0.001 \text{ м}^3/\text{с}.$$

При оценке статической точности системы принять $f_0' = 0$ и $U_{г0} = 1(t)$, а при расчете переходного процесса $f' = -1(t)$ и $U_g = 0$.