

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Технология машиностроения»

Д. Л. Стасенко

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

ПРАКТИКУМ

**по выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 1-36 01 07
«Гидропневмосистемы мобильных
и технологических машин»
дневной формы обучения**

Гомель 2022

УДК 62-52(075.8)
ББК 34.447я73
С77

*Рекомендовано научно-методическим советом
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 4 от 24.04.2019 г.)*

Рецензент: гл. конструктор ООО «ГСКТБ ГА» *А. А. Гинзбург*

Стасенко, Д. Л.
С77 Теория автоматического управления : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальности 1-36 01 07 «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин» днев. формы обучения / Д. Л. Стасенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2022. – 30 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Приведены краткие теоретические сведения, последовательность выполнения лабораторных работ, варианты индивидуальных занятий, а также даны примеры решения поставленных задач.

Для студентов специальности 1-36 01 07 «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин» дневной формы обучения.

**УДК 62-52(075.8)
ББК 34.447я73**

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2022

Лабораторная работа № 1

Построение САУ в пневматической системе с использованием пневмоаппаратов механического управления

Цель работы: изучить принципы построения автоматических пневматических систем. Получить навык разработки пневматических САУ.

Порядок выполнения работы

1. Получить задание у преподавателя
2. Выполнить описание работы автоматической пневматической системы.
3. Определить параметры пневмосистемы и построить циклограмму.

Пример выполнения

Описание работы автоматической пневматической системы.

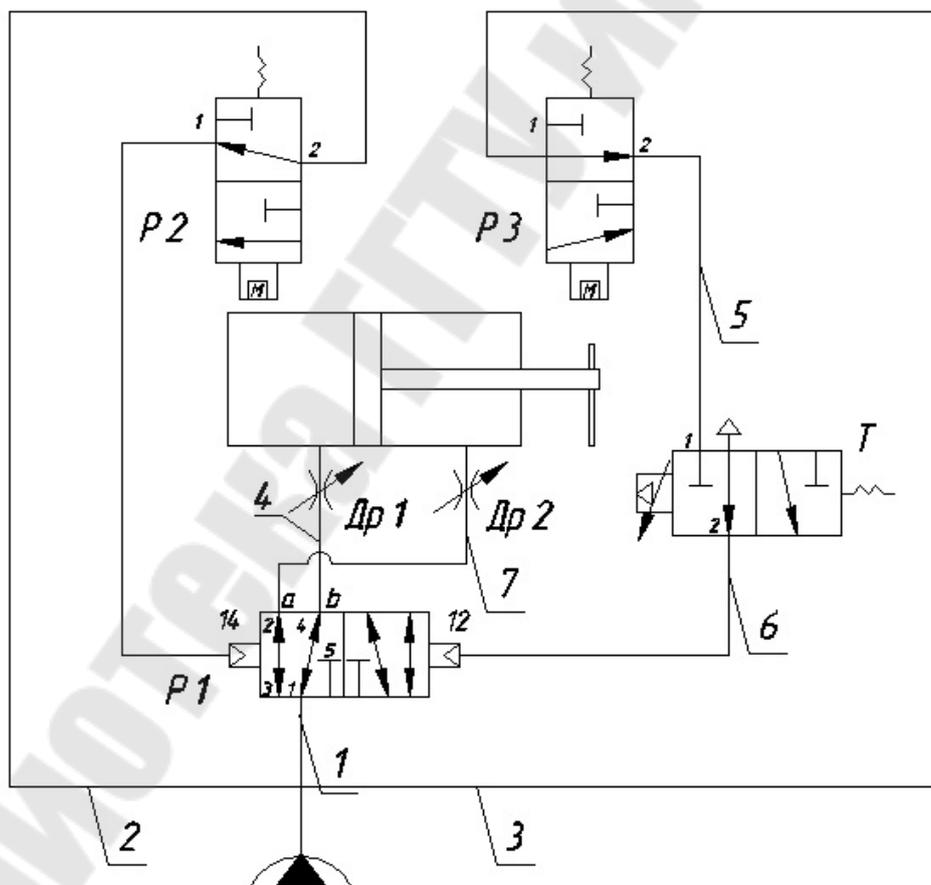


Рис. 1.1. Схема пневматической САУ

Из компрессора подается воздух в распределитель P1 по линии 1, в P2 по линии 2 и в P3 по линии 3. Под действием магнита,

переключающегося за время t^* , распределитель P2 подает воздух в линию управления 14 распределителя P1, который находится в положении *a*. В начальном положении по линии 4 воздух поступает в поршневую камеру цилиндра, т.е. поршень двигается вправо. В правом положении поршня на распределитель P3 действует магнит. Воздух подается по линии 5 в линию 6 к распределителю P1 в канал 12. Под действием давления распределитель P1 переключается в положение *в*. Воздух подается в штоковую камеру цилиндра, т.е. цилиндр перемещается влево. В левом положении поршня на распределитель P2 действует магнит. Воздух подается к распределителю P1 в канал 14. Под действием давления распределитель P1 переключается в положение *a*. Воздух подается в поршневую камеру цилиндра по линии 7, т.е. цилиндр перемещается вправо. Таким образом система работает по замкнутому циклу.

На линии 5 установлен таймер Т, который регулирует время простоя $t_2 = 1$ с.

На линиях 4 и 7 установлены дроссели Др1 и Др2, которые регулируют время подачи воздуха в поршневую $t_1 = 3$ с и штоковую $t_3 = 3$ с камеры цилиндра, соответственно.

Определение параметров пневмосистемы и построение циклограммы работы автоматической пневмосистемы

Определяем время переключения распределителя:

Рабочее давление в пневмосистеме: $P_{вх} = 450000$ Па;

Площадь трубопроводов диаметром 4 мм;

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 4^2}{4} = 12.56 \text{ мм}^2$$

Объем полости для перемещения золотника диаметром 5 мм распределителя на ход 2 мм.

$$V = \pi \frac{d^2}{4} x = 0.785 \cdot 5^2 \cdot 2 = 39.25 \text{ мм}^3 = 3.925 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$$

Определение объемного расхода воздуха подаваемого в распределитель:

$$Q = \mu S \sqrt{\frac{2P_{вх}(P_{вх} - P_o)}{RT}} = 0.5 \cdot 12.56 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{2 \cdot 450000 \cdot 450000}{287 \cdot 293}}; =$$

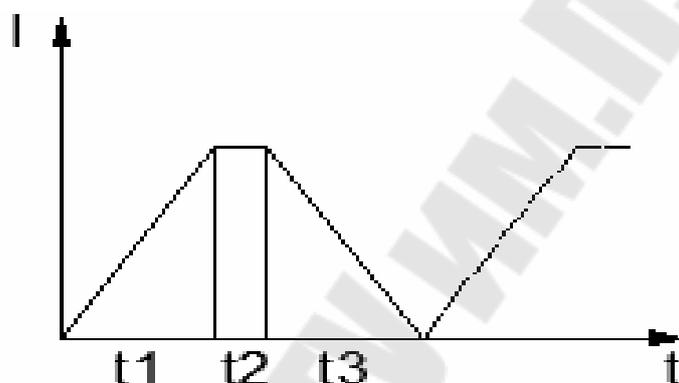
$$= 0.014 \text{ м}^3 / \text{с},$$

где μ – коэффициент потерь; $\mu = \sqrt{\frac{1}{1+\xi}} \approx 0.5$; R – универсальная газовая постоянная; $R=287$ Дж·кг/К.

Определение времени переключения золотника распределителя:

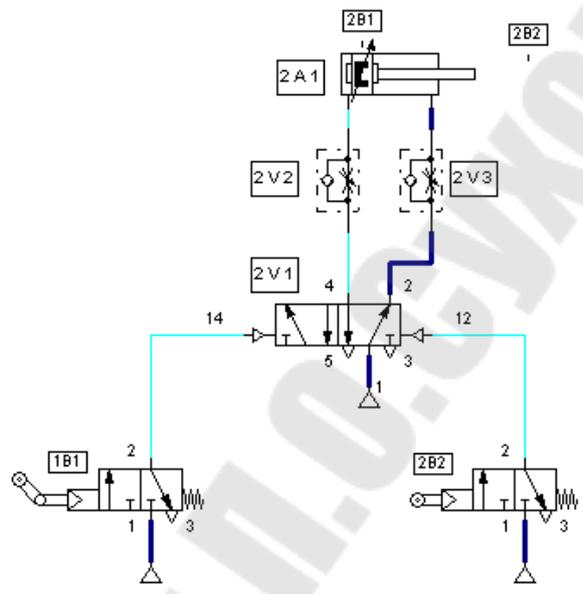
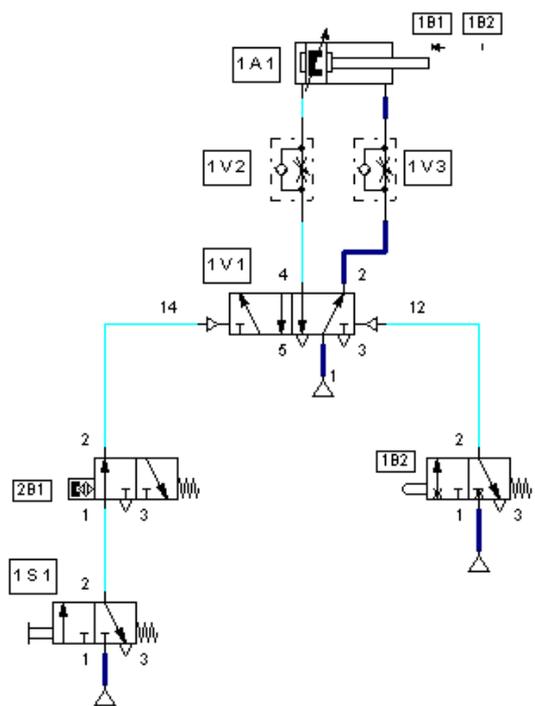
$$t = \frac{V}{Q} = \frac{3.925 \cdot 10^{-8}}{0.014} = 0.285 \cdot 10^{-5} \text{ с}$$

Для построения циклограммы воспользуемся программой *Festo Fluidsim pneumatic*. для этого соберем представленную на рисунке 1 схему в программе и задав параметры пневмосистемы получим циклограмму (рис. 2).

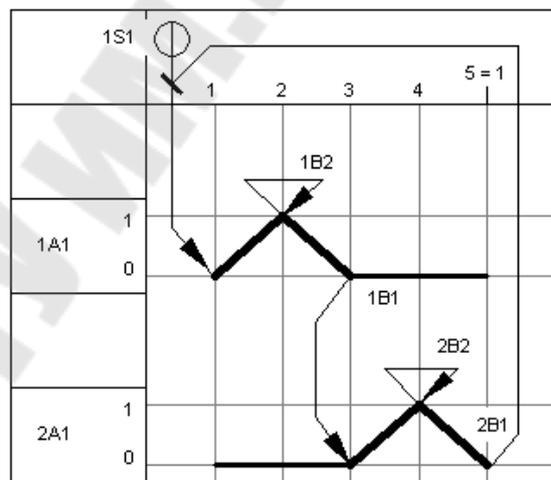


$l = 60$ – ход цилиндра; $t_1 = 3$ с – Время выдвигения цилиндра; $t_2 = 1$ время простоя цилиндра в выдвинутом положении; $t_3 = 3$ с – время задвигения цилиндра. (Время может быть отрегулировано изменением параметров дросселей Др1 и ДР2 рис.1).

Варианты схем построения автоматических пневматических систем:

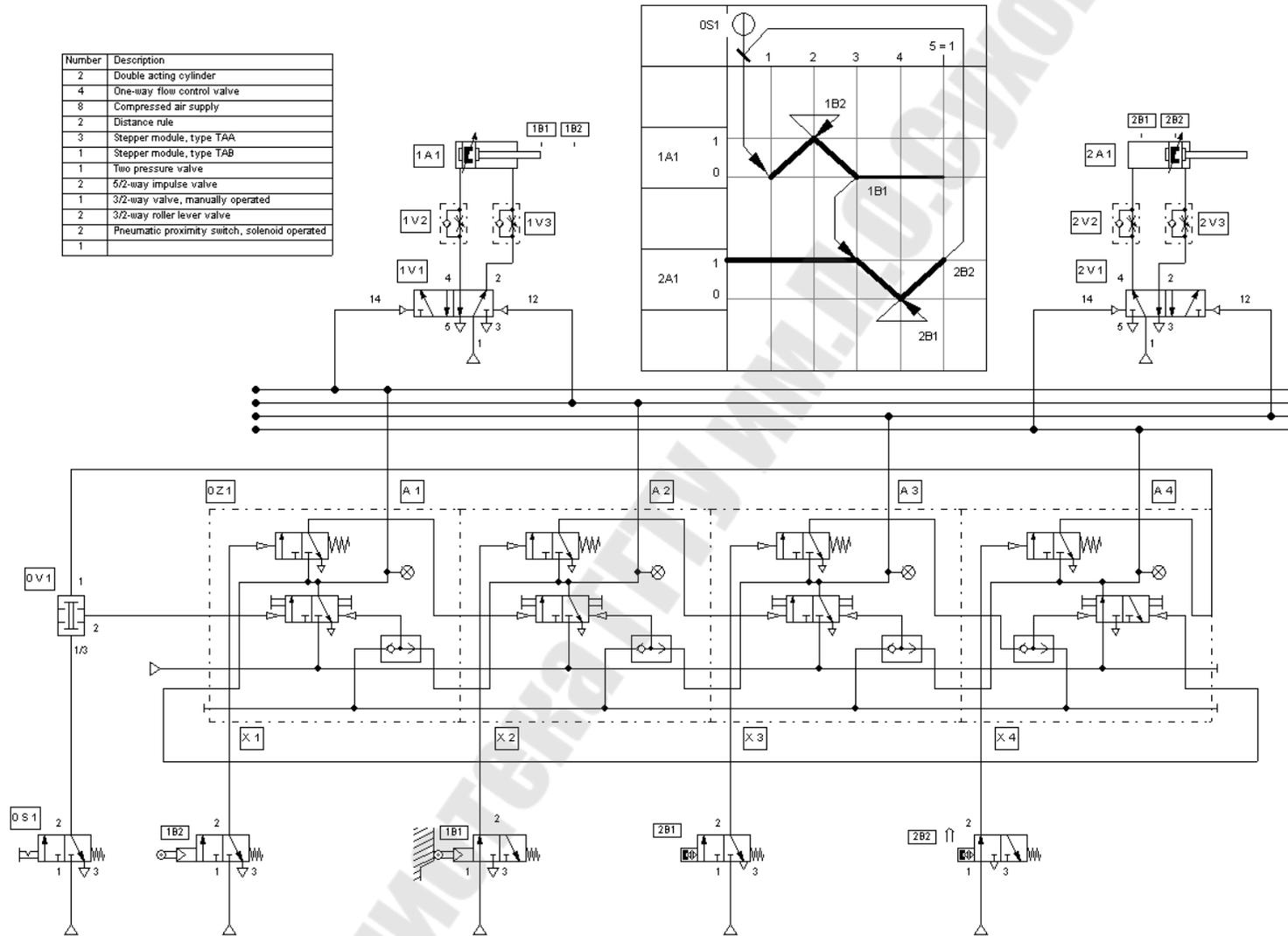


Number	Description
2	Double acting cylinder
3	Distance rule
6	Compressed air supply
4	One-way flow control valve
2	5/2-way impulse valve
1	Pneumatic proximity switch, solenoid operated
1	3/2-way valve with pushbutton
1	3/2-way idle return roller valve
1	3/2-way roller lever valve
1	
1	Pressurizing valve

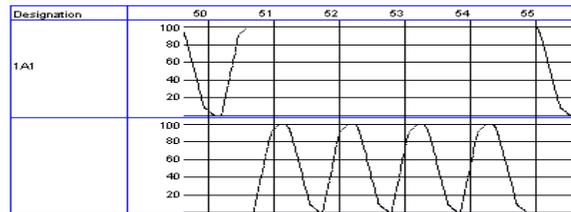
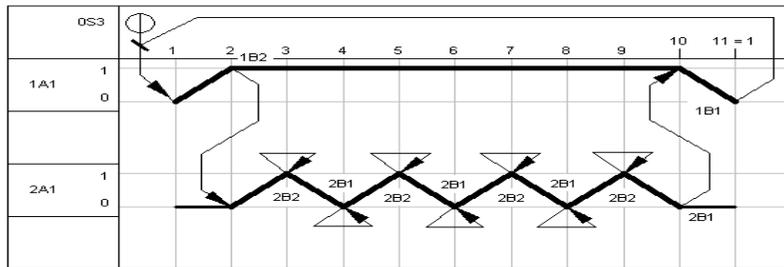


Вариант 1

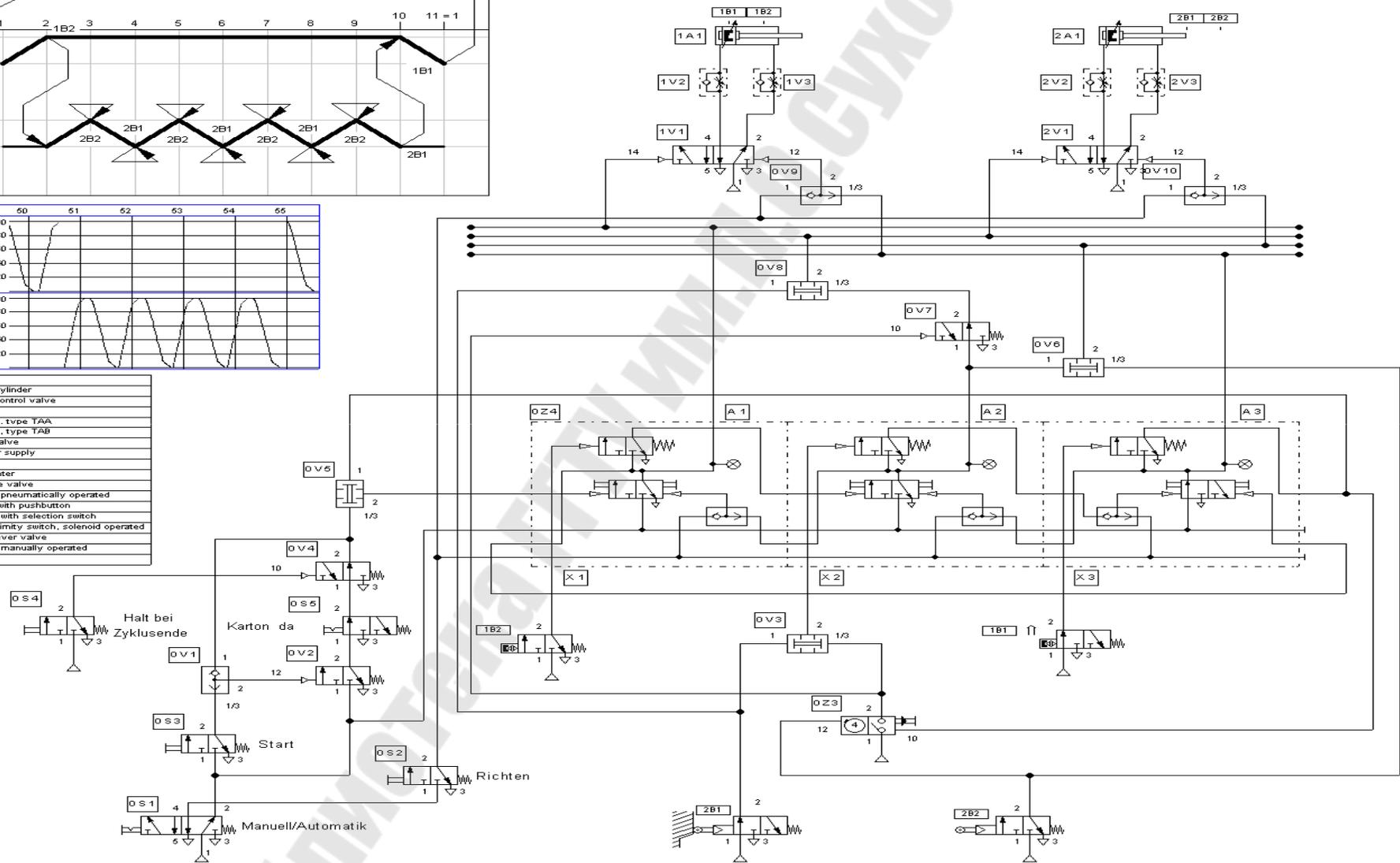
Number	Description
2	Double acting cylinder
4	One-way flow control valve
8	Compressed air supply
2	Distance rule
3	Stepper module, type TAA
1	Stepper module, type TAB
1	Two pressure valve
2	5/2-way impulse valve
1	3/2-way valve, manually operated
2	3/2-way roller lever valve
2	Pneumatic proximity switch, solenoid operated
1	



Вариант 2

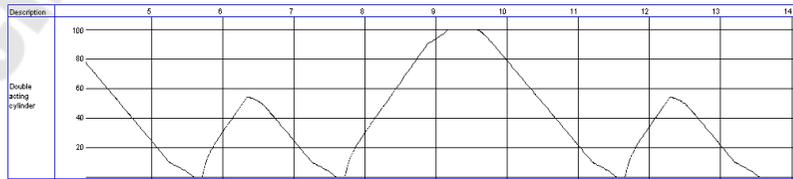
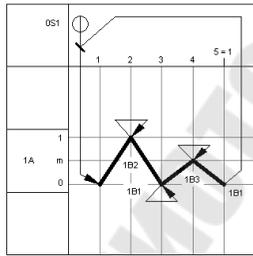
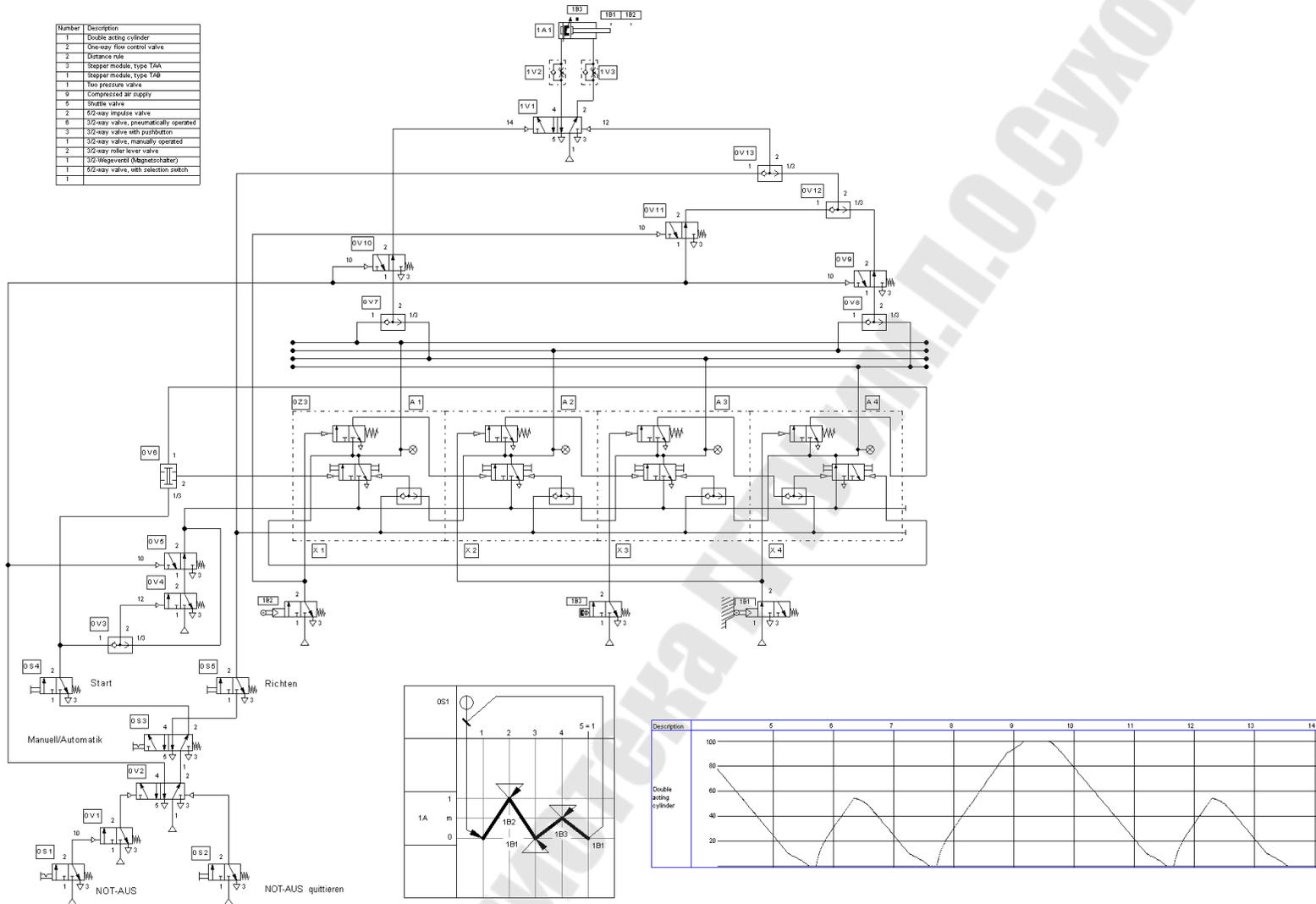


Number	Description
2	Double acting cylinder
4	One-way flow control valve
2	Distance rule
2	Stepper module, type TAA
1	Stepper module, type TAB
4	Two pressure valve
9	Compressed air supply
3	Shuttle valve
1	Pneumatic counter
2	5/2-way impulse valve
3	3/2-way valve, pneumatically operated
3	3/2-way valve with pushbutton
1	5/2-way valve, with selection switch
2	Pneumatic proximity switch, solenoid operated
2	3/2-way roller lever valve
1	3/2-way valve, manually operated
1	

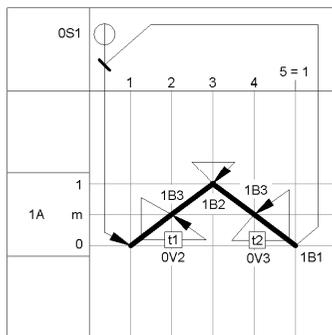


Вариант 3

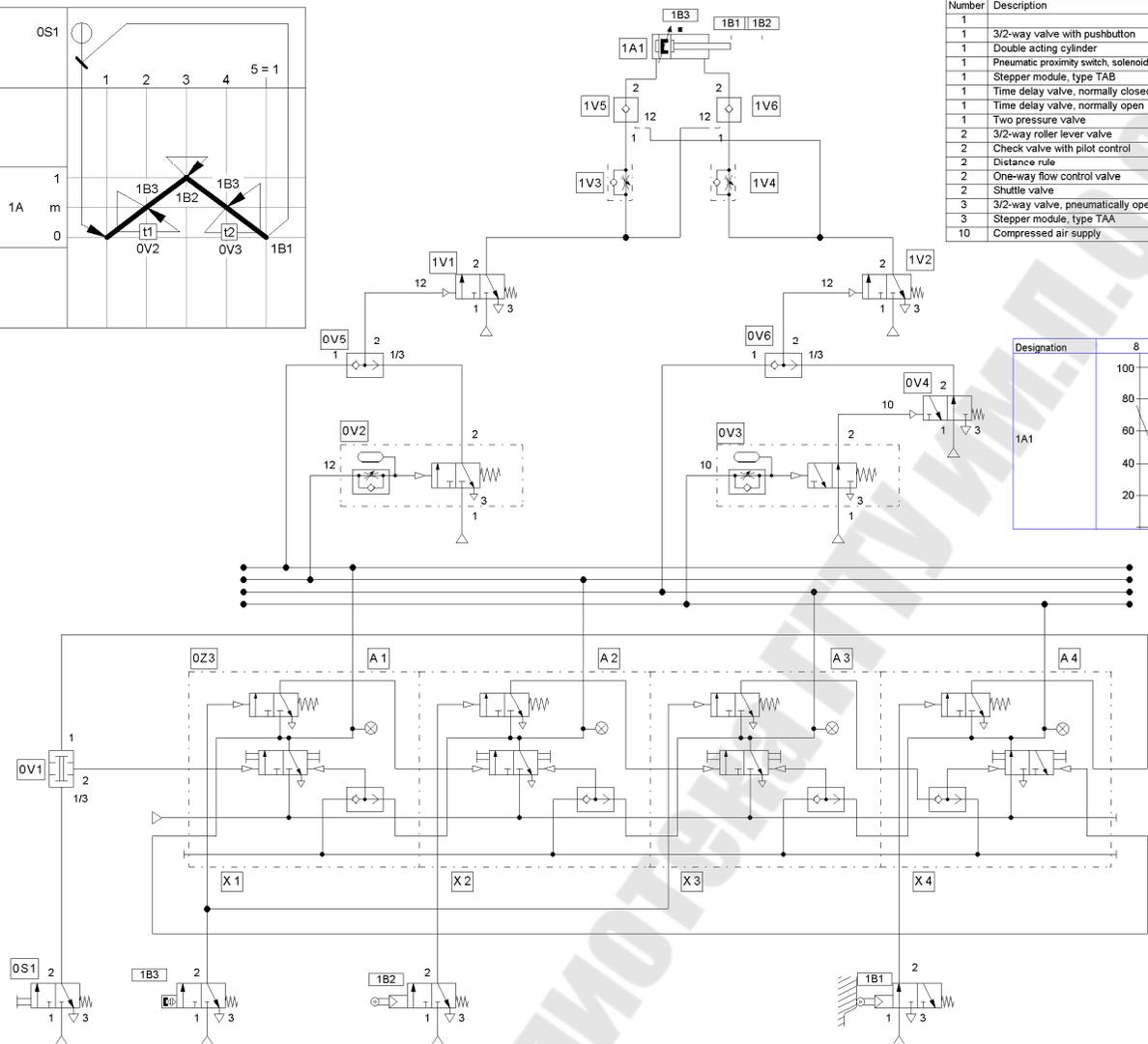
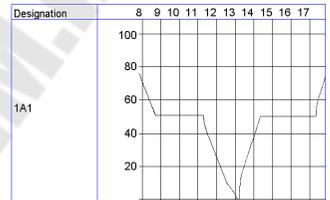
Number	Description
1	Double acting cylinder
2	One-way flow control valve
2	Distance role
2	Stopper module, type YAK
1	Stopper module, type YAB
1	Too pressure valve
9	Compressed air supply
2	Shuttle valve
2	5/2-way impulse valve
6	3/2-way valve, pneumatically operated
3	3/2-way valve with pushbutton
1	3/2-way valve, manually operated
2	3/2-way roller lever valve
1	3/2-Wegventil (Magnetzylinder)
1	5/2-way valve, with selection switch



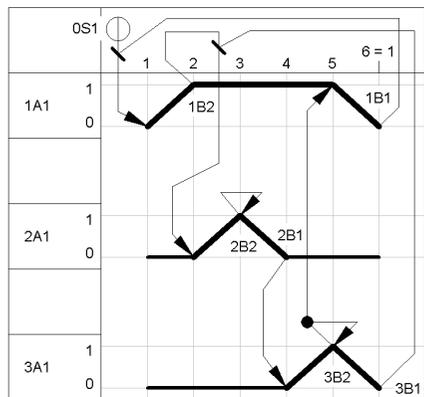
Вариант 4



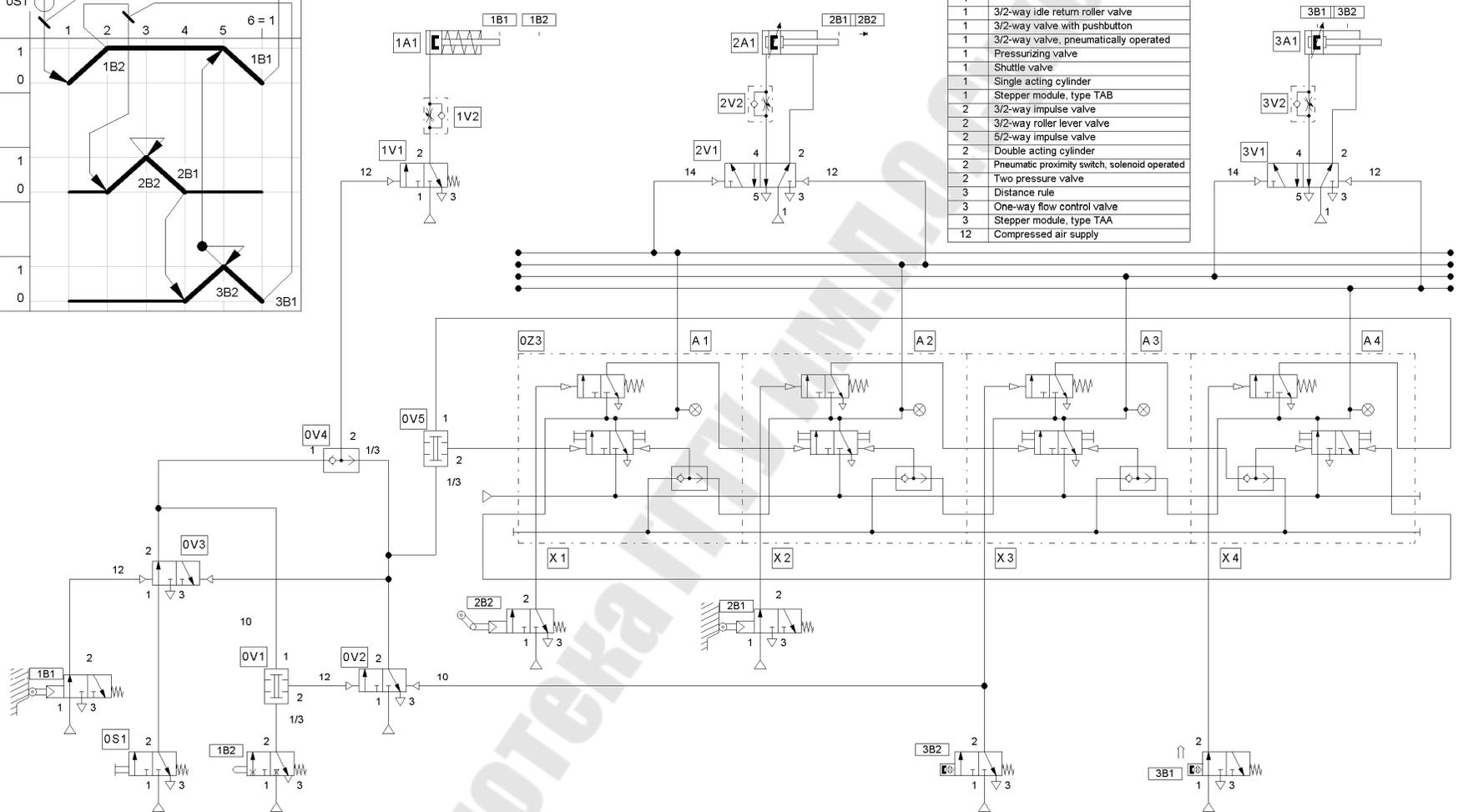
Number	Description
1	3/2-way valve with pushbutton
1	Double acting cylinder
1	Pneumatic proximity switch, solenoid operated
1	Stepper module, type TAB
1	Time delay valve, normally closed
1	Time delay valve, normally open
1	Two pressure valve
2	3/2-way roller lever valve
2	Check valve with pilot control
2	Distance rule
2	One-way flow control valve
2	Shuttle valve
3	3/2-way valve, pneumatically operated
3	Stepper module, type TAA
10	Compressed air supply



Вариант 5



Number	Description
1	
1	3/2-way idle return roller valve
1	3/2-way valve with pushbutton
1	3/2-way valve, pneumatically operated
1	Pressurizing valve
1	Shuttle valve
1	Single acting cylinder
1	Stepper module, type TAB
2	3/2-way impulse valve
2	3/2-way roller lever valve
2	5/2-way impulse valve
2	Double acting cylinder
2	Pneumatic proximity switch, solenoid operated
2	Two pressure valve
3	Distance rule
3	One-way flow control valve
3	Stepper module, type TAA
12	Compressed air supply



Вариант 6

Лабораторная работа № 2

Формирование структурной схемы автоматической системы и определение ее передаточного отношения

Цель работы: сформировать структурную схему автоматической системы и определить ее передаточное отношение.

Порядок выполнения работы

1. По выданному заданию определить передаточные отношения элементов входящих в состав автоматической пневматической системы.
2. Построить структурную схему (схемы) пневматической автоматической системы с указанием направлений передачи управляющих воздействий.
3. Определить численные значения коэффициентов K и T в передаточных отношениях элементов автоматической пневматической системы.

Примеры типовых звеньев.

Звеном системы называется ее элемент, обладающий определенными свойствами в динамическом отношении. Звенья систем регулирования могут иметь разную физическую основу (электрические, пневматические, механические и др. звенья), но относятся к одной группе. Соотношения входных и выходных сигналов в звеньях одной группы описываются одинаковыми передаточными функциями.

Простейшие типовые звенья:

- усилительное,
- интегрирующее,
- дифференцирующее,
- апериодическое,
- колебательное,
- запаздывающее.

1) Усилительное звено.



Рис. 2.1

Звено усиливает входной сигнал в K раз. Уравнение звена $y = K \cdot x$, передаточная функция $W(s) = K$. Параметр K называется **коэффициентом усиления**.

Выходной сигнал такого звена в точности повторяет входной сигнал, усиленный в K раз (см. рис. 2.1).

Примерами таких звеньев являются: механические передачи (рычажные механизмы, зубчатые передачи механических устройств автоматики), датчики, безынерционные усилители и электрические потенциометры. В автоматике регулирующие пропорциональные звенья называются П – регуляторами (пропорциональный регулятор).

2) Интегрирующее.

2.1) Идеальное интегрирующее.

Выходная величина идеального интегрирующего звена пропорциональна интегралу входной величины.



$$y = K \int_0^t x(t) dt; W(s) = \frac{K}{s}$$

При подаче на вход звена воздействия выходной сигнал постоянно возрастает (см. рис. 2.2).

Это звено астатическое, т.е. не имеет установившегося режима.

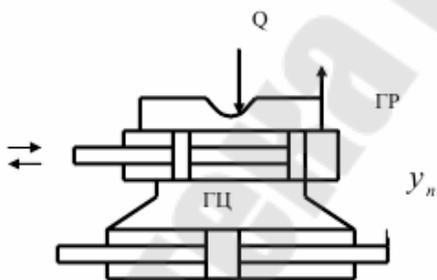
2.2) Реальное интегрирующее.



Передаточная функция этого звена имеет вид: $W(s) =$

$$\frac{K}{s(Ts+1)}$$

Переходная характеристика в отличие от идеального звена является кривой (см. рис. 2.3).



Примером интегрирующего звена является двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, если в качестве входного воздействия принять напряжение питания статора, а выходного - угол поворота ротора; пневмогидро-

+аккумуляторы (интегрирующие звенья по давлению); спидометры автомобилей; электрические счётчики; гидравлическое (пневматическое) управляющее устройство (рис. 2.3а), состоящее из гидрораспределителя и ненагруженного гидроцилиндра. Смещение поршня гидроцилиндра y_n по мере поступления расхода жидкости Q в одну из полостей гидроцилиндра непрерывно возрастает

(накапливается): $\pm y_n = \frac{1}{F_ч} \int Q dt$

Уравнение динамики поршня гидроцилиндра: $F_u \frac{dy}{dt} = Q$

3) Дифференцирующее.

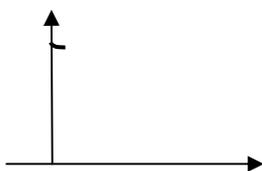
3.1) Идеальное дифференцирующее.

Выходная величина пропорциональна производной по времени от входной:

$$y = K \frac{dx(t)}{dt}; \quad W(s) = K \cdot s$$

При ступенчатом входном сигнале выходной сигнал представляет собой импульс (\square -функцию).

3.2) Реальное дифференцирующее.



Идеальные дифференцирующие звенья физически не реализуемы. Большинство объектов, которые представляют собой дифференцирующие звенья, относятся к реальным дифференцирующим звеньям. Переходная характеристика и передаточная функция этого звена имеют вид: $W(s) = \frac{Ks}{Ts+1}$.

В автоматике регулирующие дифференцирующие звенья называются дифференциаторами.

4) Аperiodическое (инерционное).

Этому звену соответствуют ДУ и ПФ вида:

$$T \frac{dy}{dt} + y = Kx; \quad W(s) = \frac{K}{Ts+1}$$

Определим характер изменения выходной величины этого звена при подаче на вход ступенчатого воздействия величины x_0 .

Изображение ступенчатого воздействия: $X(s) = \frac{x_0}{s}$. Тогда изображение выходной величины:

$$Y(s) = W(s) X(s) = \frac{K}{Ts+1} \frac{x_0}{s} = K x_0 \frac{1}{s(Ts+1)}$$

Разложим дробь на простые:

$$\frac{1}{s(Ts+1)} = \frac{A}{Ts+1} + \frac{B}{s} = \frac{As+BTs+B}{s(Ts+1)} = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts+1} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s+\frac{1}{T}}$$

Оригинал первой дроби по таблице: $L^{-1}\left\{\frac{1}{s}\right\} = 1$, второй:

$$L^{-1}\left\{\frac{1}{s+\frac{1}{T}}\right\} = e^{-\frac{t}{T}}.$$

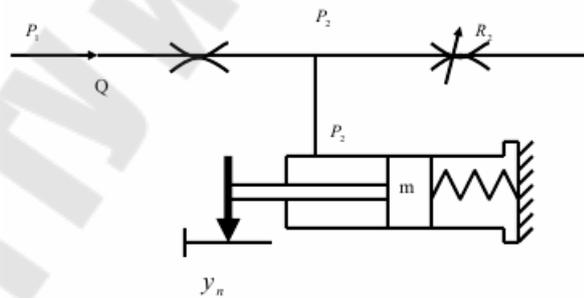
Тогда окончательно получаем:

$$y(t) = K x_0 (1 - e^{-\frac{t}{T}}).$$

Постоянная T называется **постоянной времени**.

Большинство тепловых объектов являются апериодическими звеньями. Например, при подаче на вход электрической печи напряжения ее температура будет изменяться по аналогичному закону (см. рис. 2.5). К апериодическим звеньям 1-го порядка относится широкий класс устройств автоматики, обладающих инерционными свойствами. Гидравлический регулятор (рис.2.5 а).

Регулятор состоит из нерегулируемого дросселя R_1 , регулируемого дросселя R_2 , гидроцилиндра с поршнем массой m (т.е. обладающим инерционностью). На поршень с одной стороны действует давление P_2 , а с другой пружиной.



Входная величина - P_2 . Выходная величина – перемещение поршня - y_n . Регулируя гидравлическое сопротивление R_2 , можно изменять давление P_2 и тем самым вызывать перемещение поршня. Причём, вследствие значительной инерционности поршня, отклик на изменение R_2 , т.е. перемещение поршня y_n , будет не мгновенным, а плавным – апериодическим.

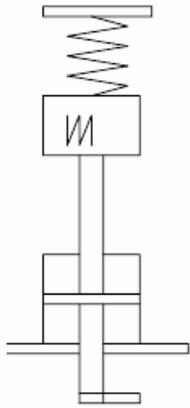
5) Колебательное звено имеет ДУ и ПФ вида

$$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = Kx$$

$$W(s) = \frac{K}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$$

При подаче на вход ступенчатого воздействия амплитудой x_0 на переходная кривая будет





иметь один из двух видов: апериодический (при $T_1 \geq 2T_2$) или колебательный (при $T_1 < 2T_2$). Например механическая колебательная система (рис. 2.6 а).

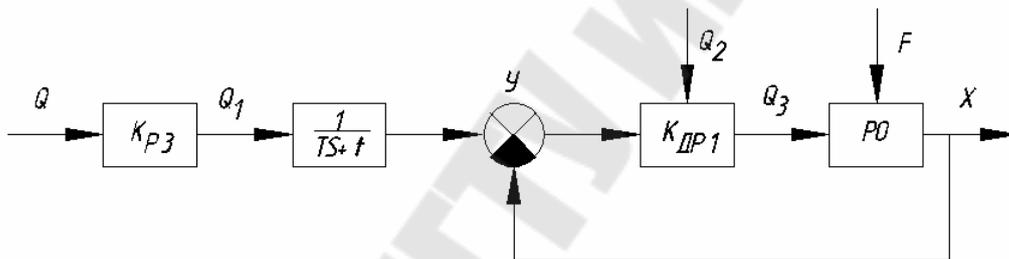
б) Запаздывающее.

$$y(t) = x(t - \tau), \quad W(s) = e^{-\tau s}$$

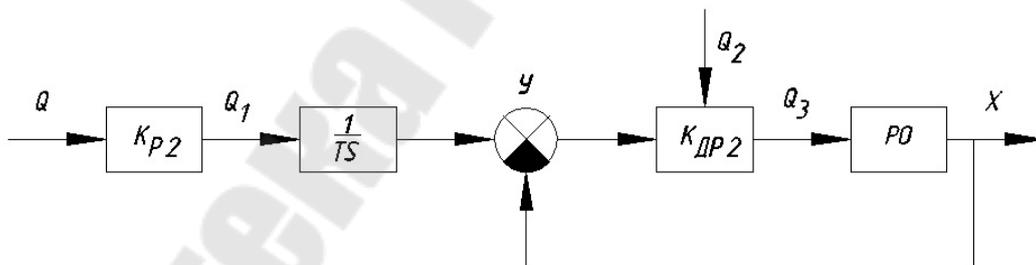
Выходная величина y в точности повторяет входную величину x с некоторым запаздыванием τ . Примеры: движение груза по конвейеру, движение жидкости по трубопроводу.

Построение структурной схемы автоматической системы рассмотрим на примере автоматической пневматической системы рис.1.

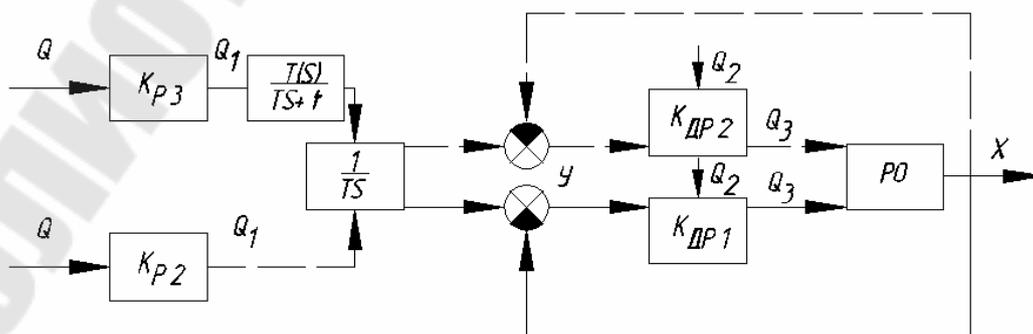
Прямой ход цилиндра:



Обратный ход цилиндра:



Общая структурная схема:



Расчет прямого хода цилиндра

Распределитель P3 преобразовывает расход, Q в $Q1$. Является пропорциональным. Передаточное отношение:

$$K_P = K_B = \frac{Q_1}{Q} = \mu = 0.5$$

Распределитель P1 с таймером T имеет передаточное отношение:

$$W_1(s) = \frac{1}{\tau + Ts}$$

Постоянные времени T и τ принимаются по циклограмме работы САУ.

Регулируемый дроссель Др1 имеет передаточное отношение:

$$K_{Др} = \frac{Q_2}{Q}$$

где Q_2 ;

$$\mu = 0.5$$

$$\Rightarrow Q_2 = 0.5 Q$$

Преобразование Лапласа:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt} \cdot P = P(s) \cdot s$$

- изменение давления

$$\frac{dA}{dt} = \frac{d}{dt} \cdot A = A(s) \cdot s$$

- изменение площади дросселя

$$Q_2 = \mu A \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)(P_2 + P_1)}{\rho}} = \mu S A(s) \sqrt{\frac{2S_1(s) S_1(s)}{\rho}} =$$

$$= 0.5 S A(s) \sqrt{\frac{2S_1(s) S_1(s)}{\rho}}$$

Передаточное отношение ДР1 и P0:

$$W_2(s) = \frac{Q_2}{Q} = \frac{Q_2(s)}{Q(s)} = \frac{0.5 S A(s) \sqrt{\frac{2S_1(s) S_1(s)}{\rho}}}{Q(s)}$$

Передаточное отношение с обратной связью:

$$W_3 = \frac{W_2}{1 + W_2} = \frac{\frac{Q_0 0.24 S A S I S}{X S}}{1 + \frac{Q_0 0.24 S A S I S}{X S}} = \frac{Q_0 0.24 S A S I S}{X S \left(1 + \frac{Q_0 0.24 S A S I S}{X S} \right)}$$

Общее передаточное отношение автоматической системы:

$$W_{\Sigma} = \frac{W_3 \cdot W_2 \cdot W_1}{1 + W_3 \cdot W_2 \cdot W_1} = \frac{1}{Q_0 0.24 S A S I S \cdot X S \left(1 + \frac{Q_0 0.24 S A S I S}{X S} \right)}$$

Лабораторная работа №3 Определение запаса устойчивости систем автоматического управления.

Цель работы: определить запас устойчивости пневматической автоматической системы управления

Порядок выполнения работы:

1. Из полученной структурной схемы пневматической автоматической системы выделить часть последовательной передачи управляющих воздействий и построить разомкнутую структурную схему.
2. Определить передаточное отношение разомкнутой части пневматической автоматической системы.
3. Используя частотные методы определить запасы устойчивости пневматической автоматической системы.

Системы автоматического управления (САУ) в зависимости от характеристик и параметров входящих в них устройств могут быть устойчивыми и неустойчивыми. Устойчивость системы – это её способность сохранять состояние равновесия или возвращаться к состоянию равновесия после устранения возмущения, нарушившего равновесие. Обеспечение устойчивости САУ – одна из основных задач, решаемых при создании САУ.

Частотные критерии устойчивости нашли широкое применение при расчетах различных (особенно электронных) систем автоматического управления. Частотные критерии устойчивости основаны на анализе характеристического уравнения в комплексной плоскости. Известны критерии Найквиста (1932) и Михайлова (1936).

Определение запаса устойчивости по АФЧХ разомкнутой части САУ.

При использовании частотного критерия устойчивости Найквиста различают два критерия: по амплитуде и по фазе.

Запас устойчивости по амплитуде определяется по АФЧХ разомкнутой части САУ, по ближайшей точке по отношению к критической. В численном значении - это длина отрезка $[0;B]$, где B – точка пересечения АФЧХ системы и отрицательной оси (рис. 3.1).

Чтобы определить, обладает ли САУ заданным запасом устойчивости по амплитуде, проводятся следующие исследования:

1. Строится годограф амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы.
2. Определяется ближайшая точка пересечения данного годографа с действительной осью по отношению к точке $[-1,0]$.
3. Определяется запас устойчивости по формуле: $\sigma = \frac{1}{h}$, где h – это отрезок $[0;B]$.
4. Если полученный запас устойчивости больше заданного, то САУ отвечает заданному запасу устойчивости, в противном случае САУ не обладает заданным запасом.

Нормированная величина запаса устойчивости:

$$\sigma = \frac{1}{|OB|} \text{ - запас устойчивости по модулю.}$$

Если $\sigma = 1$, то система находится на границе устойчивости;

если $\sigma > 1$, то система устойчивая;

если $\sigma < 1$ - система неустойчива.

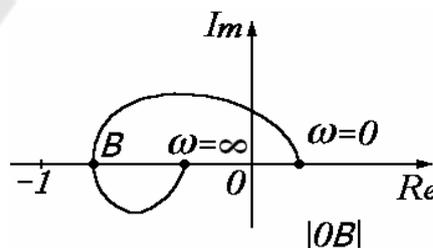


Рисунок 3.1. Определение запаса устойчивости по амплитуде с использованием АФЧХ разомкнутой системы.

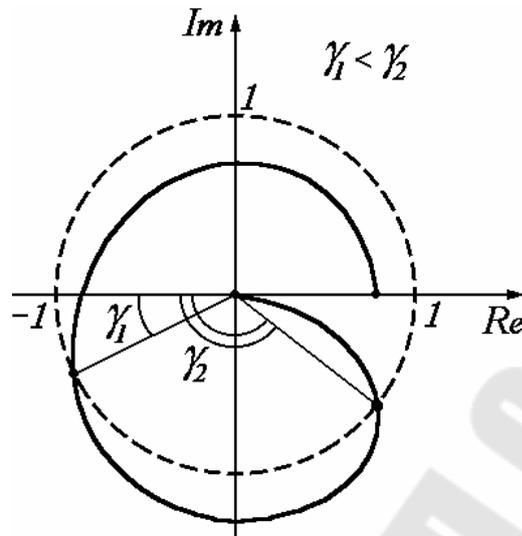


Рисунок 3.2. Определение запаса устойчивости по фазе с использованием АФЧХ разомкнутой системы.

Запасом устойчивости по фазе называется минимальный угол (γ_1 , рис.3.2), образуемый отрицательной действительной осью (Re , рис.3.2) и прямой, соединяющий начало координат и точку пересечения годографа амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы и окружности с единичным радиусом с центром в начале координат (рис. 3.2).

На практике допустимым запасом устойчивости считается угол: $\gamma_{доп} = 30^\circ \div 45^\circ$. Если $\gamma < \gamma_{доп}$, то система не обладает запасом устойчивости; если $\gamma \geq \gamma_{доп}$, то система обладает запасом устойчивости.

Если на частоте $\omega = \omega_\pi$, модуль $|W(j\omega)| = 1$ (нет усиления и нет подавления), то в контуре системы будут поддерживаться незатухающие колебания даже после исчезновения внешнего воздействия $g(t)$, т.е. система будет находиться на границе устойчивости. Характеристика $W(j\omega)$ при этом проходит через точку $(-1; j0)$. Если на частоте $\omega = \omega_\pi$ модуль $|W(j\omega)| < 1$ (подавление есть), то после исчезновения внешнего воздействия колебания в контуре затухнут, т. е. система устойчива, характеристика не охватывает точку $(-1; j0)$. Если же модуль $|W(j\omega)| > 1$ (усиление есть), то амплитуда сигналов в контуре будет неограниченно возрастать, т. е. система будет неустойчивой. Характеристика $W(j\omega)$ в этом случае охватит точку $(-1; j0)$.

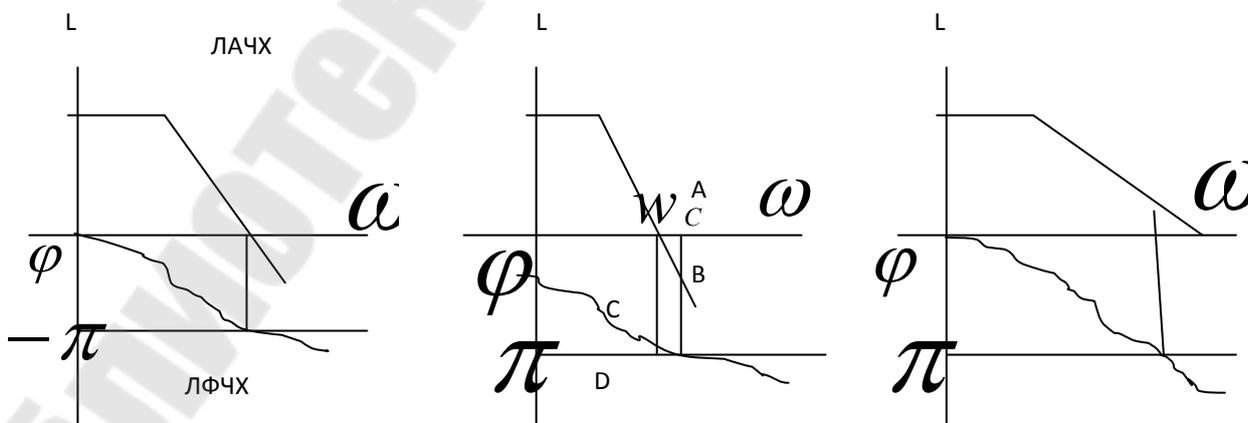
Определение запаса устойчивости по ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой части САУ.

При использовании ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы запасы устойчивости определяются согласно рис. 3.3. Если система устойчива, то при значении угла $\varphi = -\pi$ величина $L(\omega) < 0$, т.е. ордината ЛАЧХ будет отрицательной.

Чтобы определить, обладает ли САУ заданным запасом устойчивости по амплитуде и по фазе, проводятся следующие исследования:

1. Строится ЛАЧХ разомкнутой системы.
2. Строится ЛФЧХ разомкнутой системы с отрицательным направлением оси ординат.
3. По ЛАЧХ определяется частота среза ω_c , как точка пересечения графика с осью ω .
4. Для частоты среза ω_c по ЛФЧХ определяется отрезок СД - запас устойчивости по фазе (рис. 3.3).
5. По ЛФЧХ определяется частота среза ω , как точка пересечения графика с осью ω при значении угла $\varphi = -\pi$.
6. Для частоты среза ω по ЛАЧХ определяется отрезок АВ - запас устойчивости по модулю (рис. 3.3).

Если полученный запас устойчивости больше заданного, то САУ отвечает заданному запасу устойчивости, в противном случае САУ не обладает заданным запасом. На практике считается допустимым запас по амплитуде в логарифмическом масштабе - $20 \lg(\sigma)$, что составляет $\sigma_{\text{дон}} = 10 \div 15$ (дб).



а) система на границе устойчивости

б) устойчива

в) неустойчива

Рисунок 3.3. Определение запасов устойчивости с использованием ЛАЧХ и ЛФЧХ.

Лабораторная работа №4 Анализ показателей качества САУ.

Цель работы: определить показатели качества пневматической автоматической системы управления

Качество САУ определяется следующими показателями (рис.4.1):

1. **Время достижения установившегося режима** – такое время, по истечению которого для управляемой величины выполняется условие:

$$|y - y_{уст}| \leq \delta_p,$$

где y – управляемая величина; δ_p – некоторая величина (для САУ 5% от установившегося режима).

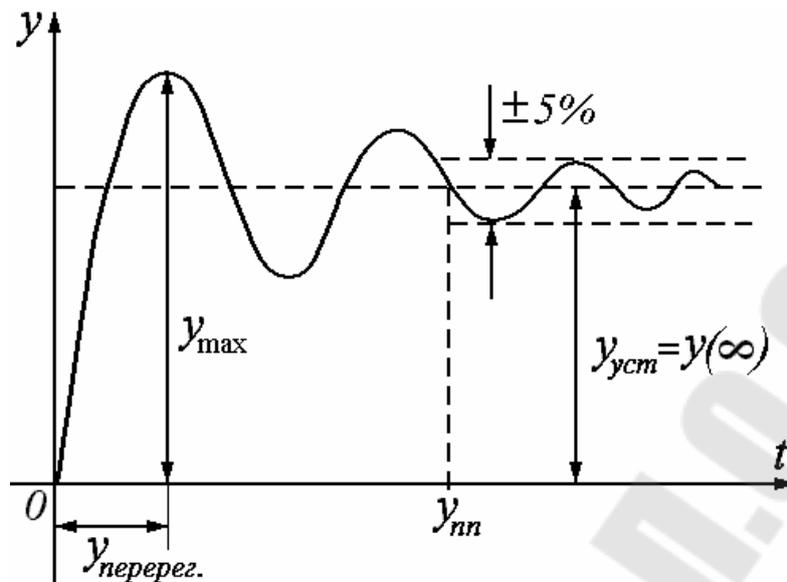


Рисунок 4.1. Переходной процесс САУ.

Время переходного процесса – отрицательное время, при котором переходный процесс по выходной координате достигает 5%-ной зоны от устойчивого значения.

2. **Перерегулирование** - это процентное соотношение разницы максимального перерегулирования и установившегося значения. **Перерегулирование σ (%)**, которое равно отношению первого максимального отклонения управляемой переменной $x(t)$ от ее установившегося значения $x(\infty)$ к этому установившемуся значению (см. рис. 4.1):

$$\sigma \% = \frac{|y_{\max} - y_{уст}|}{y_{уст}} \cdot 100\%$$

Качество управления считается удовлетворительным, если перерегулирование не превышает 30 - 40 %.

Для переходных процессов, вызванных возмущающим воздействием на входе объекта, перерегулирование можно определять как отношение второго (отрицательного) максимального отклонения A_2 к первому максимальному отклонению A_1 :

$$\sigma = 100 A_2 / A_1.$$

2. а) **Время максимального перерегулирования ($t_{перерег.}$)**, такое время, при котором выходная величина достигает своего максимального по модулю значения:

$$|y(t_{\text{перерег}})| = |y_{\text{max}}|$$

2. б) **Число перерегулирований** – это количество раз, когда управляемая величина превышает по модулю значение:

$$y_{\text{уст}} \pm 0,005 y_{\text{уст}} \quad \text{или} \quad |y - y_{\text{уст}}| > \delta_p$$

3. **Колебательность** (η) - кол-во колебаний, приходящихся на отрезок времени переходного процесса.

4. **Ошибка в установившемся режиме** (точность САУ)

$$e = |y - y_{\text{уст}}|$$

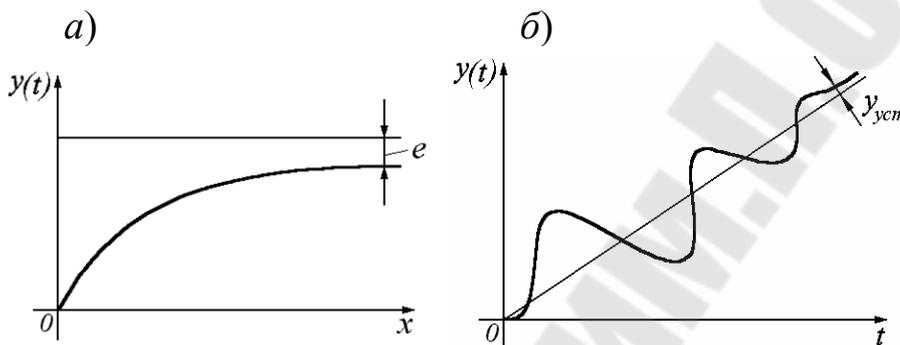


Рисунок 4.2. Ошибка в установившемся режиме
а) для статических САУ, б) для астатических систем

Первые два показателя – это показатели качества переходного процесса, а четвертый – показатель качества в установившемся режиме. Вместе они образуют группу показателей качества САУ.

Для анализа показаний качества управления могут быть использованы прямые и косвенные методы оценки. **Прямые методы** определения качества базируются на исследовании переходного процесса, дают наиболее достоверную информацию с последующим определением показаний качества. Но они являются самыми трудоемкими. **Косвенные методы** определения качества позволяют по косвенным признакам, не решая ни дифференциальных, ни характеристических уравнений, получить приближенный переходный процесс с приближенными показателями качества.

Прямые методы оценки качества:

классический метод; операторный метод; частотный метод.

Основные теоретические положения.

Классический метод определения показателей качества

Основывается на решении дифференциального уравнения, описывающего динамику процессов в САУ:

$$W(p) = \frac{a_0 p^m + a_1 p^{m-1} + \dots + a_{m-1} p + a_m}{b_0 p^n + b_1 p^{n-1} + \dots + b_{n-1} p + b_n}$$

$$a_0 \frac{d^m x(t)}{dt^m} + a_1 \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + a_{m-1} \frac{dx}{dt} + a_m x = b_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + b_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + b_{n-1} \frac{dy}{dt} + b_n y \quad (1)$$

Последнее уравнение сводится к системе дифференциальных уравнений первого порядка и разрешается одним из известных методов. Решение уравнения $y(t)=f(t)$, что и представляет собой переходный процесс.

Операторный метод.

К исходному дифференциальному уравнению (1) применяется преобразование Лапласа с учетом начальных условий.

$$a_0 p^m x - a_0 p^{m-1} x(0) - a_0 p^{m-2} x'(0) + \dots + a_1 p^{m-1} x - a_1 p^{m-2} x(0) - a_1 p^{m-3} x'(0) + \dots =$$

$$b_0 p^n y - b_0 p^{n-1} y(0) - b_0 p^{n-2} y'(0) + \dots + b_1 p^{n-1} y - b_1 p^{n-2} y(0) - b_1 p^{n-3} y'(0) + \dots$$

$$M(p)x(p) - K_x(p) = D(p)y(p) - K_y(p),$$

где K_x – это начальное условие по переменной x , K_y – начальное условие по переменной y (а также их производных).

$$y(p) = \frac{x(p)M(p) - K_x(p) + K_y(p)}{D(p)} = \frac{x(p)M(p) + K(p)}{D(p)}, \quad (2)$$

где $K(p) = K_y(p) - K_x(p)$.

1. Применяем прямое преобразование Лапласа к входной величине $x(t)$ (дает $x(p)$).
2. Получаем в операторном виде переходный процесс по уравнению (2).

Используя таблицы Лапласа, осуществляем обратное преобразование Лапласа переменной $y(p)$.

Частотный метод. Основан на преобразованиях Фурье. Если $f(t)$ – периодическая функция, то к ней можно применить преобразование:

$$f(t) = \frac{1}{T} \sum_{K=-\infty}^{\infty} F(j\omega K) e^{j\omega K t}$$

$$F(j\omega) = \int_0^T f(t) e^{-j\omega t} dt$$

Если $f(t)$ непериодическая функция, то ее тоже можно представить с помощью интеграла Фурье:

$$T \rightarrow \infty$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \rightarrow d\omega$$

Тогда $f(t)$ может быть представлена:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

- прямое преобразование Фурье;

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

- обратное преобразование.

Обобщенная частотная передаточная функция представляет собой следующее выражение:

$$y(p) = W(p)x(p) = W_0(p)$$

Обобщенная частотная передаточная функция содержит в себе как частотные характеристики объекта ($\omega(p)$), так и характеристики входного воздействия в операторном виде ($x(p)$).

Если p придать чисто мнимое значение $j\omega$, то обобщенное число

$$W_0(j\omega) = R_0(\omega) + jJ_0(\omega)$$

Определение переходного процесса через вещественную характеристику обобщенной частотной передаточной функции.

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} W_0(j\omega) e^{+j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} (R_0(\omega) + jJ_0(\omega)) (\cos \omega t + j \sin \omega t) d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} (R_0(\omega) \cos \omega t - J_0(\omega) \sin \omega t) d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} (J_0(\omega) \cos \omega t - R_0(\omega) \sin \omega t) d\omega \end{aligned}$$

Здесь действительная часть является функцией четной, а мнимая –

нечетной. Поэтому, если интеграл $\int_{-\infty}^{+\infty} = \int_{-\infty}^0 + \int_0^{+\infty}$, то для действительной части

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} (R_0(\omega) \cos \omega t + J_0(\omega) \sin \omega t) d\omega$$

Мнимая часть будет равна нулю, т.о.

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} (R_0(\omega) \cos \omega t - J_0 \sin \omega t) d\omega.$$

Все процессы при отрицательном времени равны нулю:

$$y(-t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} (R_0(\omega) \cos \omega t + J_0 \sin \omega t) d\omega = 0.$$

Тогда

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} R_0(\omega) \cos \omega t d\omega = - \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\omega) \sin \omega t d\omega.$$

С учетом этого $y(t)$ будет иметь вид:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P_0(\omega) \cos \omega t d\omega.$$

Определение показателей качества по типовым характеристикам

Если входное воздействие задано в виде мгновенного единичного воздействия, то $x(t) = 1$ - частный случай, когда входным сигналом является ступенька. Тогда

$$y(t) = h(t) = W(t)1(t),$$

$$H(p) = W(p) \frac{1}{p},$$

или в операторной форме

$$h(t) = \int_0^t \left[\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \operatorname{Re}(W) \cos \omega t d\omega \right] dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{Re}(W)}{\omega} \sin \omega t d\omega = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega)}{\omega} \sin \omega t d\omega,$$

где $\operatorname{Re}(W)$ – действительная часть передаточной функции.

Пример выполнения лабораторной работы 4 с использованием средств Matcad

Исходные данные:

$w := 1$ Частота среза

$$P(w) := \frac{22w^2 + 1}{-(-4w^3 + 10w)^2 - (22w^2 - 1)^2}$$

$t := 0, 0.1.. 70$

$P(w) = -0.048$

$$y(t) := \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{|P(w)|}{w} \cdot \sin(w \cdot t) dw$$

Установившийся режим равен 1. 5% уровень равен от 0,95 до 1,05. Качество САУ определяется следующими показателями (рис.1):

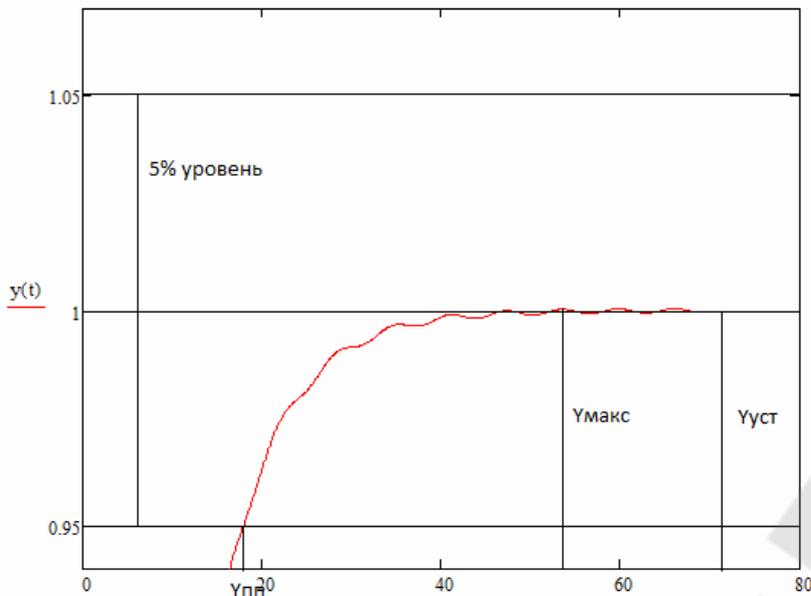


Рисунок 1 – Переходной процесс САУ

1. Время достижения установившегося режима – такое время, по истечению которого для управляемой величины выполняется условие: $|y - y_{уст}| \leq \delta_p$
 $t_M = 18\text{с}$.
2. Время переходного процесса – отрицательное время, при котором переходный процесс по выходной координате достигает 5%-ной зоны от устойчивого значения: $t_{пп} = 18\text{с}$.
3. Перерегулирование - это процентное соотношение разницы максимального перерегулирования и установившегося значения:

$$\sigma = \frac{y_{max} - y_{уст}}{y_{уст}} \cdot 100\% = \frac{1,0004 - 1}{1} \cdot 100\% = 0,04\%$$
4. Время максимального перерегулирования ($t_{перрег}$), такое время, при котором выходная величина достигает своего максимального по модулю значения: $t_{пер} = 59,78\text{ с}$ (см. рис.2)

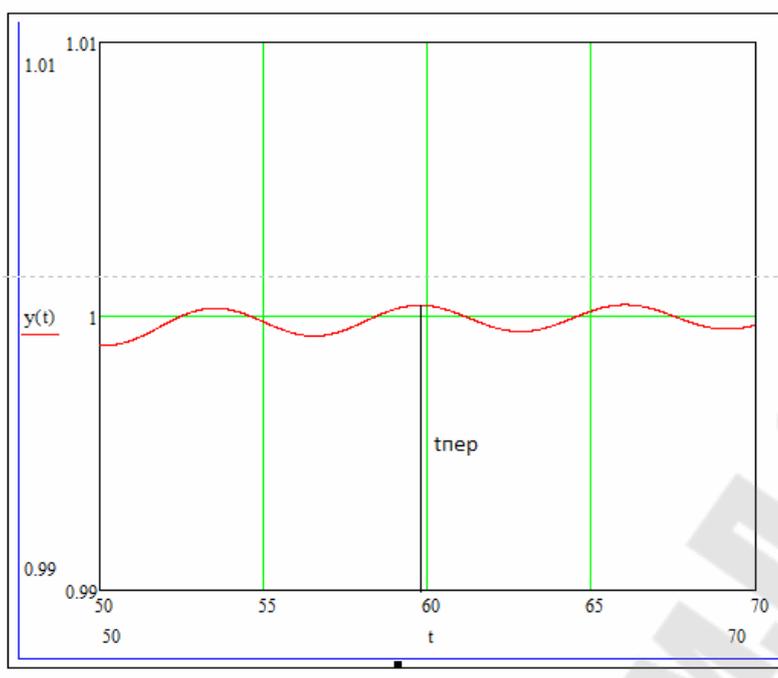


Рисунок 2 – определение времени максимального перерегулирования

5. Число перерегулирований – это количество раз, когда управляемая величина превышает по модулю значение:
- $$y_{уст} \pm 0,005 y_{уст} \quad \text{или} \quad |y - y_{уст}| > \delta_p$$
- $n = 0$

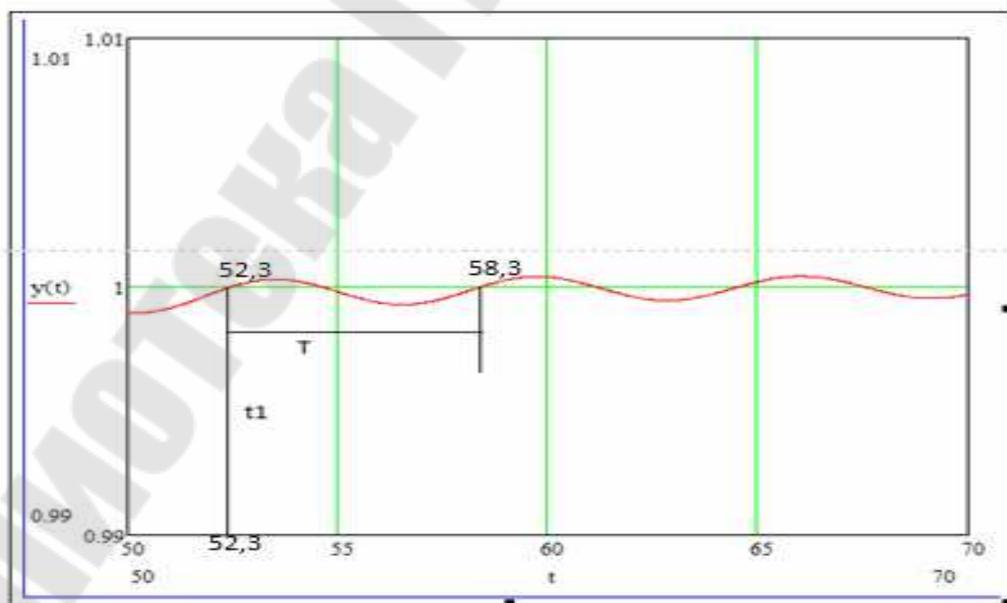


Рисунок 3 – определение t_1 и периода T

6. Колебательность (h) - кол-во колебаний, приходящихся на отрезок времени переходного процесса. $h = \frac{t_1}{T} = \frac{52,3}{6} = 8,72$ где t_1 и T определяются по рис.3: $T = t_1 - t_2 = 58,3 - 52,3 = 6$
7. Ошибка в установившемся режиме (точность САУ): $e = y_{max} - y_{уст} = 1,0004 - 1 = 0,0004$

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Бессекерский, Е. П. Попов Теория систем автоматического управления.— СПб : Профессия, 2004 .— 749 с.
2. В. А. Лукас Теория управления техническими системами: Учеб. пособие для вузов.— Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2005 .— 676 с.
3. Р. Дорф, Р. Бишоп Современные системы управления: Учеб. для вузов— Изд-во «Лаборатория Базовых Знаний», М.: 2004- 832 с.
4. В. Я. Ротач Теория автоматического управления : Учеб. для вузов— М. : Изд-во МЭИ, 2004 .— 399 с.

Стасенко Дмитрий Леонидович

**ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ**

**Практикум
по выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 1-36 01 07
«Гидропневмосистемы мобильных
и технологических машин»
дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 01.02.22.

Рег. № 48Е.

<http://www.gstu.by>