

Министерство образования Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Ивановский государственный химико-технологический университет»

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ АНАЛОГОВЫХ УЗЛОВ
ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ**

Методические указания к самостоятельной работе по курсу
«Технические средства автоматизации» для студентов дневного и
заочного обучения специальности 21.02.00.

Составитель: А.П.Самарский

Иваново 2004

Составитель А.П. Самарский
УДК 681.533

Анализ и синтез аналоговых узлов пневматических систем автоматизации. Методические указания к самостоятельной работе по курсу «Технические средства автоматизации» для студентов дневного и заочного обучения специальности 21.02.00./ Сост. А.П.Самарский; Иван. гос. хим.- технол. ун-т. Иваново, 2004. 40 с.

В методических указаниях рассмотрены методики анализа и синтеза узлов алгебраических и временных преобразований пневматических сигналов. Приведены примеры анализа и синтеза принципиальных схем пневматических узлов и устройств с детализацией наиболее сложных моментов использования соответствующих методик. Даны задания для самостоятельного анализа и синтеза принципиальных схем пневматических узлов и устройств.

Ил. 55. Библиогр.:5 назв.

Рецензент

доктор технических наук С.П.Бобков (Ивановский государственный химико-технологический университет)

1. АНАЛИЗ СТАТИКИ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ АНАЛОГОВЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ.

Целью анализа статики принципиальной схемы пневматического узла является получение уравнения статики узла или его статической характеристики по выбранному каналу по виду принципиальной схемы. Процедура анализа статики является формальной и при отсутствии ошибок приводит к однозначному результату.

Методика анализа статики включает в себя следующие этапы:

1. Принимаются допущения относительно свойств рабочей среды и элементов схемы.

Эти допущения позволяют построить линейную модель статики анализируемой схемы и заключаются в следующем:

- а) рабочая среда – сжатый воздух – является идеальным газом;
- б) течение воздуха в дросселях ламинарно и изотермично;
- в) перепады давления на дросселях достаточно малы, следовательно проводимости дросселей не зависят от величин расходов;
- г) включение в схему вспомогательных элементов – повторителей, задатчиков, переключателей, измерительных приборов – не оказывает влияния на статическую характеристику анализируемого узла.

2. Анализируемая схема подвергается упрощениям путем исключения вспомогательных элементов.

Из анализируемой схемы могут быть исключены все элементы, не влияющие на формирование статической характеристики. При этом важно сохранить функциональные взаимосвязи между остающимися в схеме основными элементами. Вспомогательными элементами, подлежащими исключению из анализируемой схемы являются мало-мощные повторители, усилители мощности, задатчики, реле переключения, клапаны-переключатели и распределители, манометры и т. п.

3. На анализируемой схеме выделяют элементы или группы элементов с известными статическими характеристиками.

Этот этап играет ключевую роль в анализе статики пневматических узлов и определяет правильность конечного результата анализа. При анализе статики пневматических схем построенных на основе мембранных унифицированных элементов, на принципиальной схеме выделяют следующие элементы и простейшие структуры:

- а) дроссельные сумматоры (рис.1.1);
- б) симметрично включенные элементы сравнения (рис.1.2);
- в) несимметрично включенные элементы сравнения (рис.1.3).

Используя эти простейшие составляющие можно построить линейную модель статики пневматического узла или устройства

любой сложности.

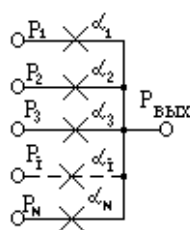


Рис.1.1. Дроссельный сумматор.

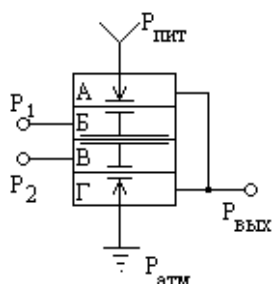


Рис.1.2. Симметрично включенный элемент сравнения.

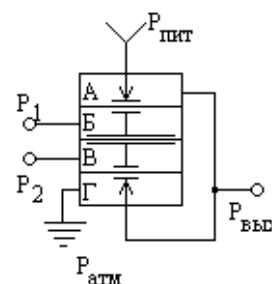


Рис.1.3. Несимметрично включенный элемент сравнения.

Элементы сравнения, показанные на рис.1.2. и рис.1.3 имеют 2 входа (P_1 и P_2). Для построения аналоговых пневматических устройств используются также четырех- и шестивходовые элементы сравнения.

4. Для каждого выделенного элемента (или группы элементов) составляется список входных и выходных давлений.

Составление такого списка не является обязательным и при небольшом числе выделенных элементов может быть пропущено. Однако, для исключения возможных ошибок составлять такие списки рекомендуется. Обычно список входных и выходных давлений имеет вид таблицы:

Таблица 1.1

№	Группа (элементы)	Входы	Выходы

5. Для каждой выделенной группы элементов записывается уравнение статики.

Для дроссельных сумматоров (рис.1.1) уравнения статики записываются в виде:

$$P_{\text{ВЫХ}} = \sum_{i=1}^N K_i P_i, \quad \text{где} \quad K_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{j=1}^N \alpha_j}, \quad (1.1)$$

а α_i - проводимость дросселя в i -й ветви дроссельного сумматора.

Для симметрично включенных элементов сравнения, охваченных отрицательными обратными связями, уравнения статики записываются в виде баланса входных давлений с учетом знаков входных камер. Нечетные (по счету сверху) входные камеры являются положи-

тельными, а четные – отрицательными (на рис.1.1 и 1.2 положительными будут входные камеры Б, а отрицательными – камеры В).

$$\sum_{i=1}^N P_i = 0. \quad (1.2)$$

Для несимметрично включенных элементов сравнения, охваченных отрицательными обратными связями, Уравнения статики записываются в виде баланса сил, приложенных к мембранному блоку с учетом знаков входных камер.

$$P_{\text{вых}} f + \sum_{i=1}^N P_i (F-f) = 0, \quad (1.3)$$

где F и f – эффективные площади мембран элемента сравнения с большим и малым жестким центром, соответственно.

Без учета обратных связей уравнения статики элемента сравнения запишутся, как:

$$P_{\text{вых}} = K_N \sum_{i=1}^N P_i \quad (1.4)$$

– для симметричной схемы включения

и
$$P_{\text{вых}} = K_N \left[P_{\text{вых}} f + \sum_{i=1}^N P_i (F-f) \right] \quad (1.5)$$

– для несимметричной схемы включения, где K_N – коэффициент передачи элемента сравнения.

Уравнения статики выделенных элементов и функциональных групп записываются с учетом списка входных и выходных давлений (Табл.1.1).

6.Полученная система уравнений решается относительно выходного давления анализируемой схемы.

Это решение является искомым уравнением статики.

Пример 1.

Получить статическую характеристику узла (рис.1.4).

Анализ принципиальной схемы будем проводить в соответствии с вышеизложенной методикой

1. Принимаем типовые допущения относительно свойств рабочей среды и элементов схемы (этот пункт не требует никаких действий, поэтому в последующих примерах его опускаем).

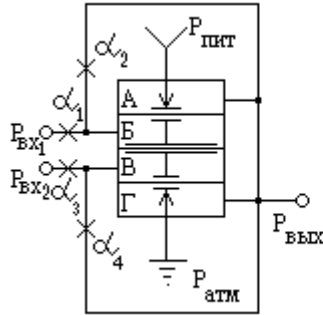


Рис.1.4.

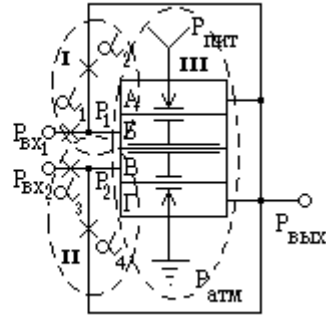


Рис.1.5.

2. Анализируемая схема не содержит вспомогательных элементов и в упрощениях не нуждается.
3. Выделяем на принципиальной схеме группы элементов с известными статическими характеристиками. Представляем анализируемую схему, как совокупность двух дроссельных сумматоров и элемента сравнения (рис.1.5).
4. Составляем список входных и выходных давлений для каждой выделенной группы элементов (табл.1.2).

Таблица 1.2

№	Группа (элементы)	Входы	Выходы
I	Др. сумматор $\alpha_1\alpha_2$	$P_{ВХ1}, P_{ВЫХ}$	P_1
II	Др. сумматор $\alpha_3\alpha_4$	$P_{ВХ2}, P_{ВЫХ}$	P_2
III	Элемент сравнения	P_1, P_2	$P_{ВЫХ}$

При составлении списка входных и выходных давлений выходным давлениям дроссельных сумматоров $\alpha_1\alpha_2$ и $\alpha_3\alpha_4$ (изначально не обозначенным на схеме) присвоены обозначения, соответственно, P_1 и P_2 .

5. С использованием табл.1.2 и соотношений (1.1), (1.2) запишем уравнения статики выделенных групп элементов:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= K_1 P_{ВХ1} + K_2 P_{ВЫХ} \\ P_2 &= K_3 P_{ВХ2} + K_4 P_{ВЫХ} \\ P_1 - P_2 &= 0 \end{aligned} \right\} (1.6)$$

Коэффициенты уравнений системы (1.6) определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}; K_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}; \\ K_3 &= \frac{\alpha_3}{\alpha_3 + \alpha_4}; K_4 = \frac{\alpha_4}{\alpha_3 + \alpha_4}. \end{aligned} \right\} (1.7.)$$

6. Решаем систему уравнений (1.6) относительно $P_{\text{ВЫХ}}$:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= P_2 \\
 K_1 P_{\text{ВХ1}} + K_2 P_{\text{ВЫХ}} &= K_3 P_{\text{ВХ2}} + K_4 P_{\text{ВЫХ}} \\
 K_1 P_{\text{ВХ1}} - K_3 P_{\text{ВХ2}} &= (K_4 - K_2) P_{\text{ВЫХ}} \\
 P_{\text{ВЫХ}} &= \frac{K_1 P_{\text{ВХ1}} - K_3 P_{\text{ВХ2}}}{K_4 - K_2}. \quad (1.8)
 \end{aligned}$$

Уравнение (1.8) является уравнением статики анализируемой схемы. Если в это уравнение подставить проводимости дросселей из системы (1.7), то оно примет вид:

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{\alpha_1(\alpha_3 + \alpha_4)P_{\text{ВХ1}} - \alpha_3(\alpha_1 + \alpha_2)P_{\text{ВХ2}}}{\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3}. \quad (1.9)$$

Данная подстановка в некоторых случаях упрощает вид искомого соотношения, а в других – нет, поэтому необходимость выполнения такой подстановки определяется в каждом случае отдельно.

Пример 2.

Проанализировать схему пропорционального регулятора ФР 0098; вывести уравнение статики регулятора (рис.1.6).

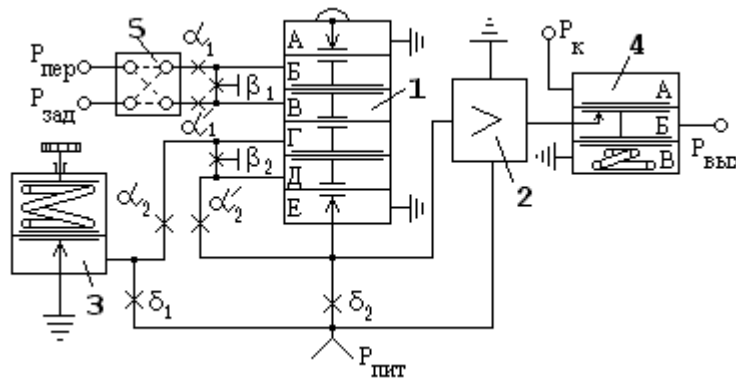


Рис.1.6. Принципиальная схема П-регулятора ФР 0098.

1. Принципиальная схема регулятора содержит ряд элементов, не влияющих на формирование статической характеристики, и может быть упрощена. С целью упрощения исключим из принципиальной схемы следующие элементы:

- усилитель мощности 2,
- задатчик контрольной точки 3,
- отключающее реле 4,
- переключатель вида действия 5.

После сделанных упрощений схема регулятора примет вид (Рис.1.7):

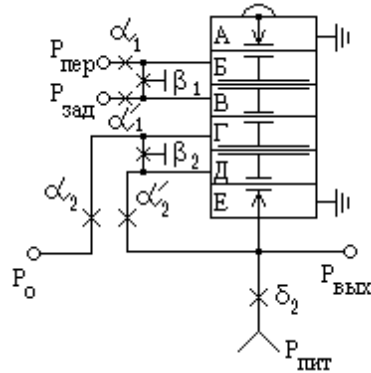


Рис.1.7. Упрощенная принципиальная схема регулятора ФР 0098.

2. Выделяем на упрощенной принципиальной схеме группы элементов с известными статическими характеристиками (рис.1.8). Как видно из рисунка, на схеме выделено пять функциональных групп элементов:

- дроссельный сумматор $\alpha_1 \beta_1$ (I);
- дроссельный сумматор $\alpha'_1 \beta_1$ (II);
- дроссельный сумматор $\alpha_2 \beta_2$ (III);
- дроссельный сумматор $\alpha'_2 \beta_2$ (IV);
- элемент сравнения (V).

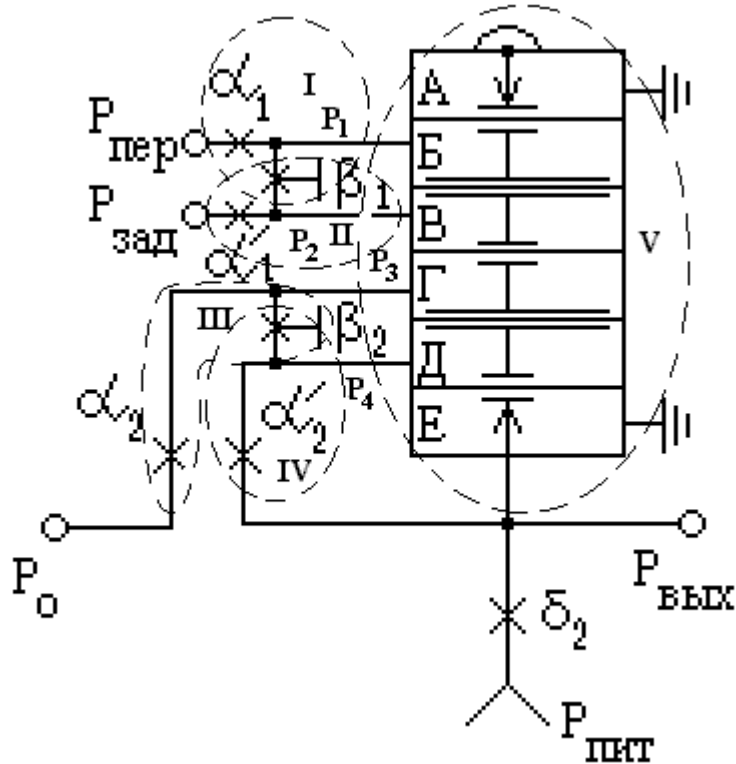


Рис.1.8. Выделение функциональных групп элементов на принципиальной схеме регулятора ФР 0098.

3. Вводим недостающие обозначения входных и выходных давлений выделенных групп и составляем соответствующий список (табл.1.3).

Таблица 1.3

№	Группа (элементы)	Входы	Выходы
I	Дроссельный сумматор $\alpha_1\beta_1$	$P_{\text{пер}}, P_2$	P_1
II	Дроссельный сумматор $\alpha'_1\beta_1$	$P_{\text{зад}}, P_1$	P_2
III	Дроссельный сумматор $\alpha_2\beta_2$	P_o, P_4	P_3
IV	Дроссельный сумматор $\alpha'_2\beta_2$	$P_{\text{вых}}, P_3$	P_4
V	Элемент сравнения	P_1, P_2, P_3, P_4	$P_{\text{вых}}$

В табл.1.3 обозначение P_o соответствует выходному давлению задатчика контрольной точки, а P_1, P_2, P_3, P_4 – выходным давлениям дроссельных сумматоров I, II, III и IV.

4. Для выделенных функциональных групп элементов записываем уравнения статики с учетом обозначений, приведенных в табл.1.3.

$$P_1 = K_1 P_{\text{пер}} + K_2 P_2 \quad (1.10)$$

$$P_2 = K_3 P_{\text{зад}} + K_4 P_1 \quad (1.11)$$

$$P_3 = K_5 P_o + K_6 P_4 \quad (1.12)$$

$$P_4 = K_7 P_{\text{вых}} + K_8 P_3 \quad (1.13)$$

$$P_1 - P_2 + P_3 - P_4 = 0 \quad (1.14)$$

В данной системе уравнений коэффициенты имеют следующие значения:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1}; K_2 = \frac{\beta_1}{\alpha_1 + \beta_1}; \\ K_3 &= \frac{\alpha'_1}{\alpha'_1 + \beta_1}; K_4 = \frac{\beta_1}{\alpha'_1 + \beta_1}; \\ K_5 &= \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2}; K_6 = \frac{\beta_2}{\alpha_2 + \beta_2}; \\ K_7 &= \frac{\alpha'_2}{\alpha'_2 + \beta_2}; K_8 = \frac{\beta_2}{\alpha'_2 + \beta_1}. \end{aligned} \right\} (1.15)$$

5. Решаем систему уравнений (1.10) – (1.14) относительно $P_{\text{вых}}$. Для этого из уравнения (1.10) вычтем уравнение (1.11) и из уравнения (1.12) вычтем уравнение (1.13).

$$P_1 - P_2 = K_1 P_{\text{пер}} + K_2 P_2 - K_3 P_{\text{зад}} - K_4 P_1; \quad (1.16)$$

$$P_3 - P_4 = K_5 P_o + K_6 P_4 - K_7 P_{\text{вых}} - K_8 P_3. \quad (1.17)$$

В схеме реального регулятора параметры постоянных дросселей подобраны таким образом, что $\alpha_1 = \alpha'_1$ и $\alpha_2 = \alpha'_2$. Из уравнений (1.15) следует, что $K_1 = K_3$; $K_2 = K_4$; $K_5 = K_7$ и $K_6 = K_8$. При этом уравнения (1.16) и (1.17) принимают вид:

$$(1 + K_2)(P_1 - P_2) = K_1(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}}); \quad (1.18)$$

$$(1 + K_6)(P_3 - P_4) = K_5(P_o - P_{\text{вых}}) \quad (1.19)$$

или

$$P_1 - P_2 = \frac{K_1(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}})}{(1 + K_2)}; \quad (1.20)$$

$$P_3 - P_4 = \frac{K_5(P_o - P_{\text{вых}})}{(1 + K_6)}. \quad (1.21)$$

Подставив соотношения (1.20) и (1.21) в (1.14), получим:

$$\frac{K_1(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}})}{(1 + K_2)} = \frac{K_5(P_{\text{вых}} - P_o)}{(1 + K_6)} \quad (1.22)$$

или

$$P_{\text{вых}} = \frac{K_1(1 + K_6)}{K_5(1 + K_2)}(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}}) + P_o = K_p(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}}) + P_o. \quad (1.23)$$

Соотношение (1.23) является искомым уравнением статики регулятора ФР 0098. При подстановке в это уравнение соотношений (1.15) получаем:

$$P_{\text{вых}} = \frac{\alpha_1(\alpha_2 + 2\beta_2)}{\alpha_2(\alpha_1 + 2\beta_1)}(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}}) + P_o. \quad (1.24)$$

2. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ АНАЛОГОВЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ.

Целью анализа динамики принципиальной схемы пневматического узла является получение уравнения динамики узла или его

передаточной функции по выбранному каналу по виду принципиальной схемы. Процедура анализа динамики является формальной и при отсутствии ошибок приводит к однозначному результату.

Методика анализа динамики включает в себя следующие этапы:

1. Принимаются допущения относительно свойств рабочей среды и элементов схемы.

Эти допущения позволяют построить линейную модель динамики анализируемой схемы и заключаются в следующем:

- а) рабочая среда – сжатый воздух – является идеальным газом;
- б) течение воздуха в дросселях ламинарно и изотермично;
- в) перепады давления на дросселях достаточно малы, следовательно проводимости дросселей не зависят от величин расходов;
- г) включение в схему вспомогательных элементов – повторителей, задатчиков, переключателей, измерительных приборов – не оказывает влияния на динамические характеристики анализируемого узла.
- д) отдельно решается вопрос об учете влияния неидеальности элементной базы на динамику анализируемой схемы.

2. Анализируемая схема подвергается упрощениям путем исключения вспомогательных элементов.

Из анализируемой схемы могут быть исключены все элементы, не влияющие на формирование динамических характеристик. При этом важно сохранить функциональные взаимосвязи между остающимися в схеме основными элементами. Вспомогательными элементами, подлежащими исключению из анализируемой схемы являются мало-мощные повторители, усилители мощности, задатчики, реле переключения, клапаны-переключатели и распределители, манометры и т. п.

3. На анализируемой схеме выделяют элементы или группы элементов, динамика которых может быть описана элементарными динамическими звеньями или их типовыми соединениями.

Этот этап играет ключевую роль в анализе динамики пневматических узлов и определяет правильность конечного результата анализа.

При анализе динамики пневматических схем, построенных на основе мембранных унифицированных элементов, на принципиальной схеме выделяют следующие элементы и простейшие структуры:

- а) элементы сравнения (рис.1.2 и рис.1.3), которые могут быть представлены в виде сумматора, последовательно соединенного с пропорциональным звеном, обладающим большим коэффициентом передачи $K_N \geq 300$ (рис.2.1, а);
- б) дроссельные сумматоры (рис.1.1), которые могут быть представлены в виде сумматора с масштабируемыми входами (рис.2.1, б);

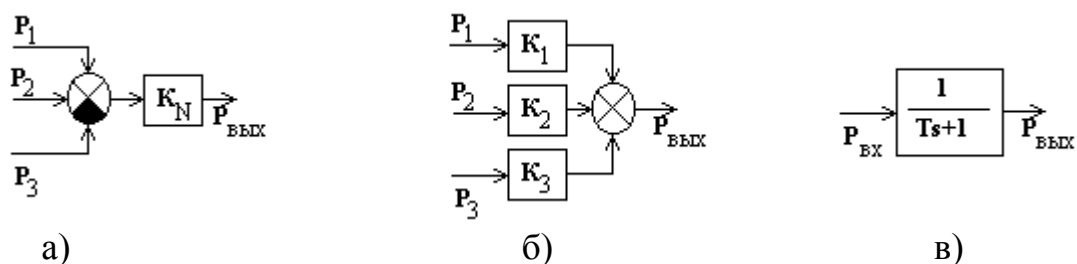


Рис.2.1. Элементы динамических структур пневматических приборов и устройств.

в) специально организованные (рис.2.2, а) и паразитные (рис.2.2, б) инерционные звенья, состоящие из одного или нескольких дросселей и пневмоемкости или входной камеры мембранного пневматического элемента.

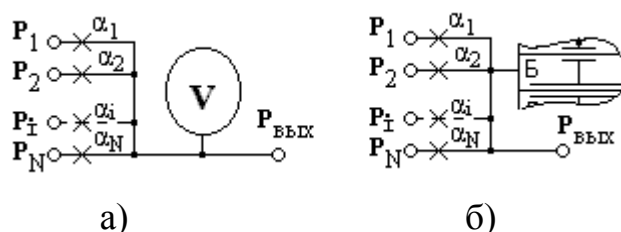


Рис.2.2. Специально организованное (а) и паразитное (б) инерционные звенья.

4. Для каждого выделенного элемента (или группы элементов) составляется список входных и выходных давлений.

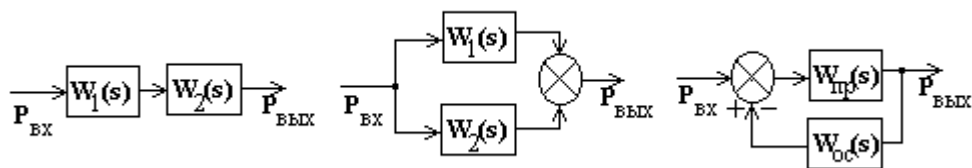
Выполнение этого пункта в методиках анализа статики и динамики пневматических устройств полностью аналогично. Список составляется в виде Табл.1.1.

5. Каждой выделенной группе элементов ставится в соответствие элементарное динамическое звено или типовое соединение элементарных звеньев.

В результате получаем структурную схему анализируемого устройства.

6. Полученная структурная схема подвергается преобразованиям и упрощениям, итогом которых является передаточная функция анализируемой схемы по выбранному каналу.

Для преобразования структурной схемы обычно используют два приема – укрупнение блоков структурной схемы с использованием правил блок-алгебры передаточных функций и перенос связей по направлению или против направления распространения сигнала. Напомним кратко правила блок-алгебры передаточных функций, которые подробно рассматриваются в курсе Теории управления. Эти правила позволяют производить замену в структурных схемах типовых соединений звеньев укрупненными блоками с эквивалентными передаточными функциями (рис.2.3).



$$W_{\text{ЭКВ}} = W_1(s)W_2(s) \quad \text{а)} \quad W_{\text{ЭКВ}} = W_1(s) + W_2(s) \quad \text{б)} \quad W_{\text{ЭКВ}} = \frac{W_{\text{пр}}(s)}{1 \pm W_{\text{пр}}(s)W_{\text{ос}}(s)} \quad \text{в)}$$

Рис.2.3. Типовые соединения звеньев: а) – последовательное, б) – параллельное, в) – охват обратной связью и их эквивалентные передаточные функции.

Перенос связей в структурной схеме наглядно иллюстрирует рис.2.4.

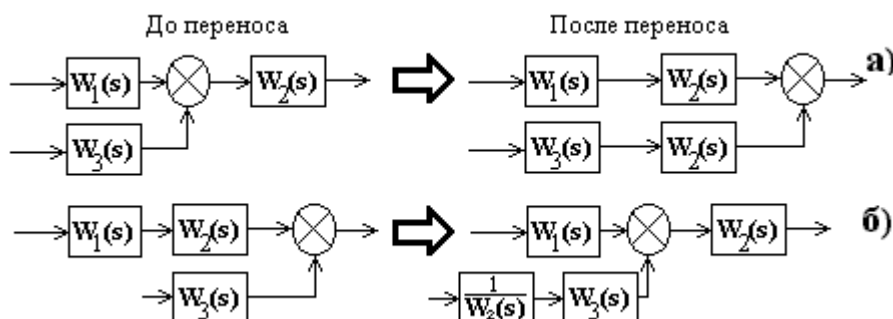


Рис.2.4. Перенос связей а) по направлению и б) против направления распространения сигнала.

Из рис.2.4 можно заключить, что перенос связи по направлению распространения сигнала требует включения в канал этой связи звена с передаточной функцией $W_2(s)$, а при переносе связи против направления распространения сигнала в ее канал включается звено с передаточной функцией $\frac{1}{W_2(s)}$.

7. Если известна передаточная функция идеального узла или устройства, то в полученной передаточной функции можно выделить балластную составляющую, которая характеризует влияние паразитных инерционных звеньев на динамику анализируемой схемы.

$$W(s) = W_{\text{ид}}(s)W_6(s). \quad (2.1)$$

Пример 3.

Проанализировать динамику узла (рис.2.5), получить передаточную функцию узла по каналу $P_{\text{ВХ}} \rightarrow P_{\text{ВЫХ}}$.

1. Принимаем типовые допущения относительно свойств рабочей среды и элементов схемы (этот пункт не требует никаких дейст-

- вий, поэтому в последующих примерах его опускаем).
2. Анализируемая схема не содержит вспомогательных элементов, не влияющих на динамику узла, и в упрощениях не нуждается.
 3. Выделяем на анализируемой схеме функциональные группы элементов, которые могут быть представлены типовыми динамическими структурами (рис.2.6).

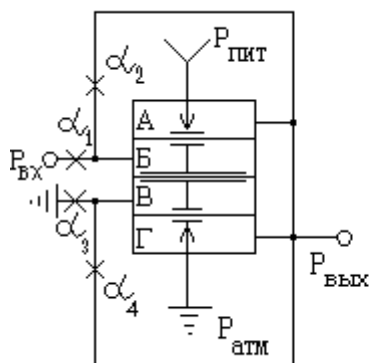


Рис.2.5.

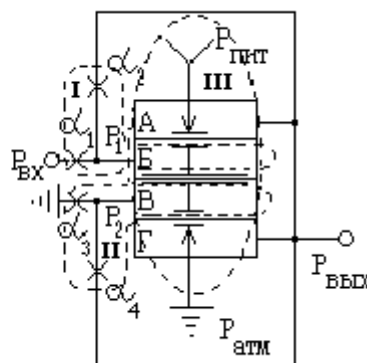


Рис.2.6.

При выделении функциональных групп учитываем емкостную нагрузку дроссельных сумматоров $\alpha_1\alpha_2$ и $\alpha_3\alpha_4$ и объединяем их в группы I и II с камерами, соответственно, «Б» и «В» элемента сравнения. Группа III состоит только из элемента сравнения.

4. Составляем список входных и выходных давлений для выделенных групп элементов (табл.2.1).

Таблица 2.1.

№	Группа (элементы)	Входы	Выходы
I	Др. сумматор $\alpha_1\alpha_2$, V_B	$P_{ВХ}, P_{ВЫХ}$	P_1
II	Др. сумматор $\alpha_3\alpha_4$, V_B	$P_{АТМ}, P_{ВЫХ}$	P_2
III	Элемент сравнения	P_1, P_2	$P_{ВЫХ}$

5. Представим выделенные группы элементов в виде эквивалентных динамических структур (рис.2.6):

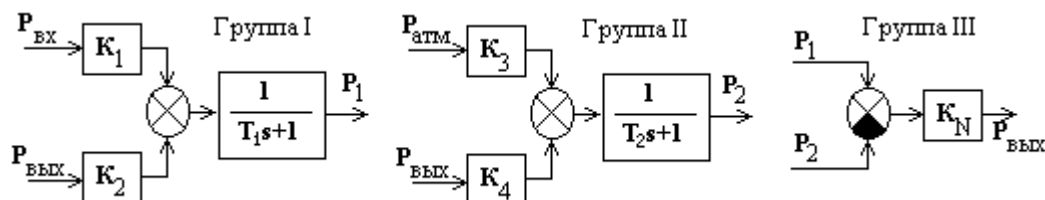


Рис.2.6.

Коэффициенты передачи динамических структур, изображенных на рис.2.6, имеют значения, аналогичные (1.7), а постоянные времени T_1 и T_2 вычисляются из соотношений:

$$T_1 = \frac{V_B M}{R \Theta (\alpha_1 + \alpha_2)}; \quad T_2 = \frac{V_B M}{R \Theta (\alpha_3 + \alpha_4)}, \quad (2.2)$$

где V_B и V_B – соответственно, объемы камер элемента сравнения «Б» и «В»; M – средняя молекулярная масса воздуха (0.029 кг/моль); Θ – абсолютная температура; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и α_4 – проводимости соответствующих дросселей.

Соединяя линии с одноименными давлениями динамических структур, изображенных на рис.2.6, получим структурную схему анализируемого узла (рис.2.7):

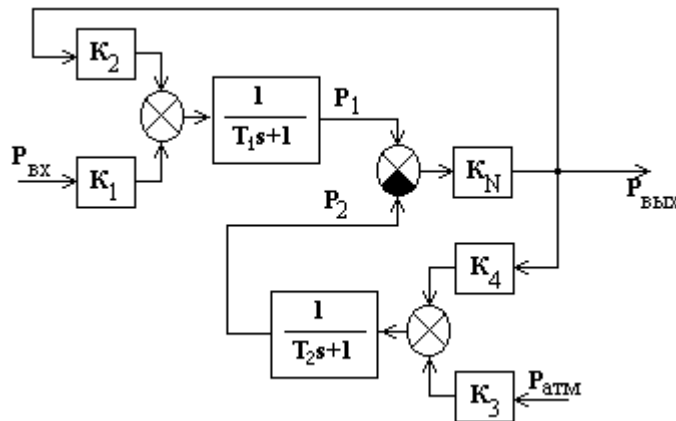


Рис.2.7.

6. Упростим полученную структурную схему и выведем передаточную функцию анализируемого узла. Поскольку $P_{\text{атм}}=0$, пропорциональное звено с коэффициентом передачи K_3 из структурной схемы исключаем. Положительную обратную связь в элементе сравнения перенесем со входа инерционного звена с передаточной функцией $\frac{1}{T_1 s + 1}$ на его выход, включив в канал этой связи звено с передаточной функцией $\frac{1}{T_1 s + 1}$. Структурная схема принимает вид (рис.2.8):

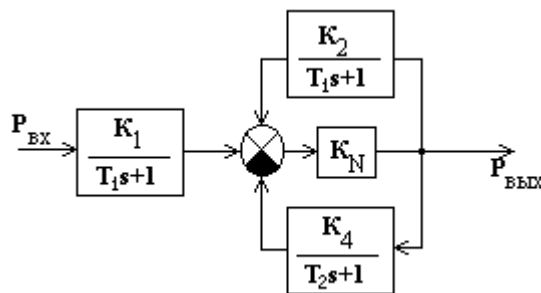


Рис.2.8.

С использованием правил блок-алгебры структурных схем запишем передаточную функцию анализируемого узла:

$$W(s) = \frac{K_1}{T_1s+1} \cdot \frac{K_N}{1+K_N \left(\frac{K_4}{T_2s+1} - \frac{K_2}{T_1s+1} \right)} \quad (2.3)$$

Приведем дроби $\frac{K_4}{T_2s+1}$ и $\frac{K_2}{T_1s+1}$ к общему знаменателю, разделим числитель и знаменатель полученного выражения на K_N и приравняем к нулю слагаемое $\frac{1}{K_N}$ ввиду его малости (менее 0,003). Передаточная функция (2.3) примет вид:

$$W(s) = \frac{K_1(T_1s+1)(T_2s+1)}{(T_1s+1)[K_4(T_1s+1) - K_2(T_2s+1)]} = \frac{K_1(T_2s+1)}{K_4(T_1s+1) - K_2(T_2s+1)} = \frac{K_1(T_2s+1)}{(K_4T_1 - K_2T_2)s + (K_4 - K_2)} \quad (2.4)$$

В знаменателе выражения (2.4) вынесем за скобки множитель $(K_4 - K_2)$ и обозначим полученную в результате дробь $\frac{K_4T_1 - K_2T_2}{K_4 - K_2}$, как $T_{\text{экв}}$.

Искомая передаточная функция запишется в виде:

$$W(s) = \frac{K_1(T_2s+1)}{(K_4 - K_2)(T_{\text{экв}}s+1)} \quad (2.5)$$

Анализируемое устройство по принципу действия представляет собой узел умножения пневмосигнала на постоянный коэффициент и передаточная функция идеального узла, согласно (1.8), будет равна:

$$W_{\text{ид}}(s) = \frac{K_1}{K_4 - K_2} \quad (2.6)$$

Из соотношений (2.5) и (2.6) нетрудно получить балластную составляющую передаточной функции анализируемой схемы:

$$W_{\text{б}}(s) = \frac{W(s)}{W_{\text{ид}}(s)} = \frac{(T_2s+1)}{(T_{\text{экв}}s+1)} \quad (2.7)$$

Балластная составляющая передаточной функции (2.7) может быть использована для оценки динамической погрешности анализируемого узла, обусловленной неидеальностью используемых элементов. С этой целью следует построить частотные характеристики идеального и реального узлов по известной из теории управления методике. Динамическая погрешность анализируемой схемы считается удовле-

творительной в диапазоне частот входного сигнала, в котором отличия АЧХ реальной схемы от АЧХ идеальной не превышают 10%, а различия ФЧХ идеальной и реальной схем не превышают 15°. Применение этой методики оценки динамической погрешности анализируемых схем рассмотрим в следующем примере.

Пример 4.

Проанализировать динамику регулятора ФР 0098 (рис.1.6); Вывести передаточную функцию по каналу ($P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}}$) $\rightarrow P_{\text{вых}}$; Оценить динамическую погрешность реализации закона регулирования при заданных значениях настроечных параметров.

1. Выполнение 1-го и 2-го этапов методики анализа полностью совпадает с выполнением соответствующих этапов при анализе статики (Пример 2), поэтому анализ динамики регулятора начнем с выделения на упрощенной принципиальной схеме (рис.1.7) функциональных групп элементов с известными динамическими свойствами (рис.2.9).

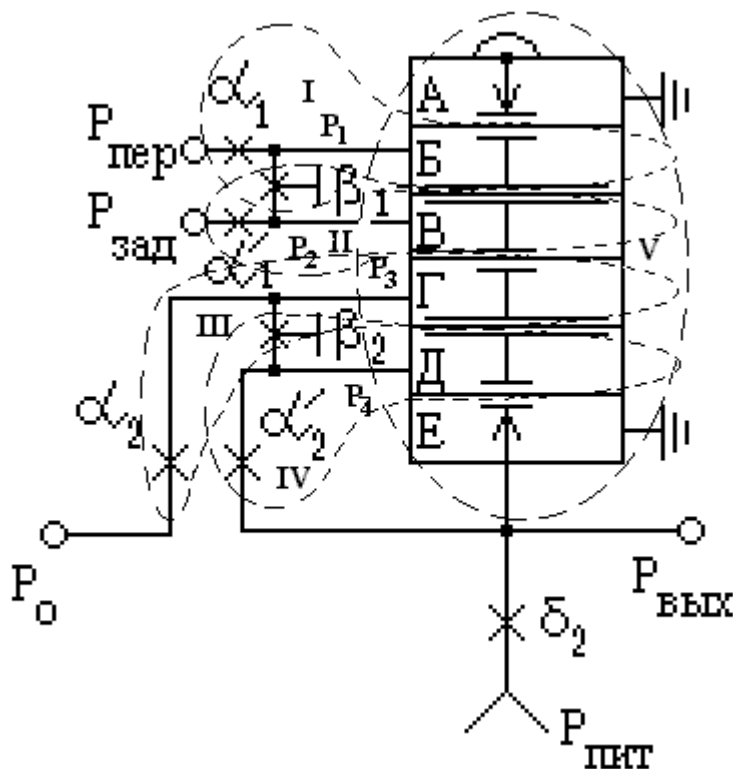


Рис.2.9.

Выделение функциональных групп на анализируемой схеме во многом совпадает с аналогичным этапом Примера 2, однако выделенные группы I – IV кроме дроссельных сумматоров включают в себя и соответствующие камеры (Б, В, Г и Д) элемента сравнения.

2. Список входных и выходных давлений выделенных групп приводится в табл. 2.2 . Для давлений, не обозначенных на исходной принципиальной схеме, введены новые обозначения.

Таблица 2.2

№	Группа (элементы)	Входы	Выходы
I	Дроссельный сумматор $\alpha_1\beta_1, V_B$	$P_{пер}, P_2$	P_1
II	Дроссельный сумматор $\alpha'_1\beta_1, V_B$	$P_{зад}, P_1$	P_2
III	Дроссельный сумматор $\alpha_2\beta_2, V_\Gamma$	P_0, P_4	P_3
IV	Дроссельный сумматор $\alpha'_2\beta_2, V_D$	$P_{вых}, P_3$	P_4
V	Элемент сравнения	P_1, P_2, P_3, P_4	$P_{вых}$

3. Представим выделенные группы элементов в виде эквивалентных динамических структур (рис.2.10):

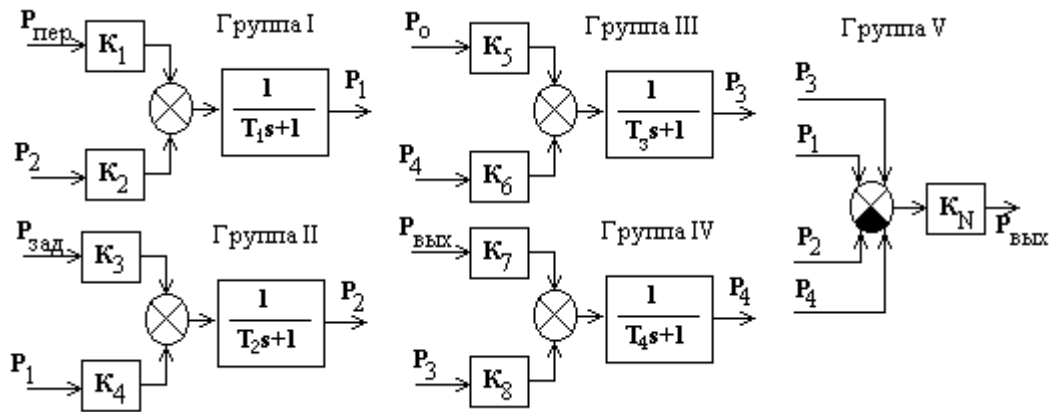


Рис.2.10.

Соединив линии с одноименными давлениями, получим структурную схему регулятора ФР 0098 (рис.2.11):

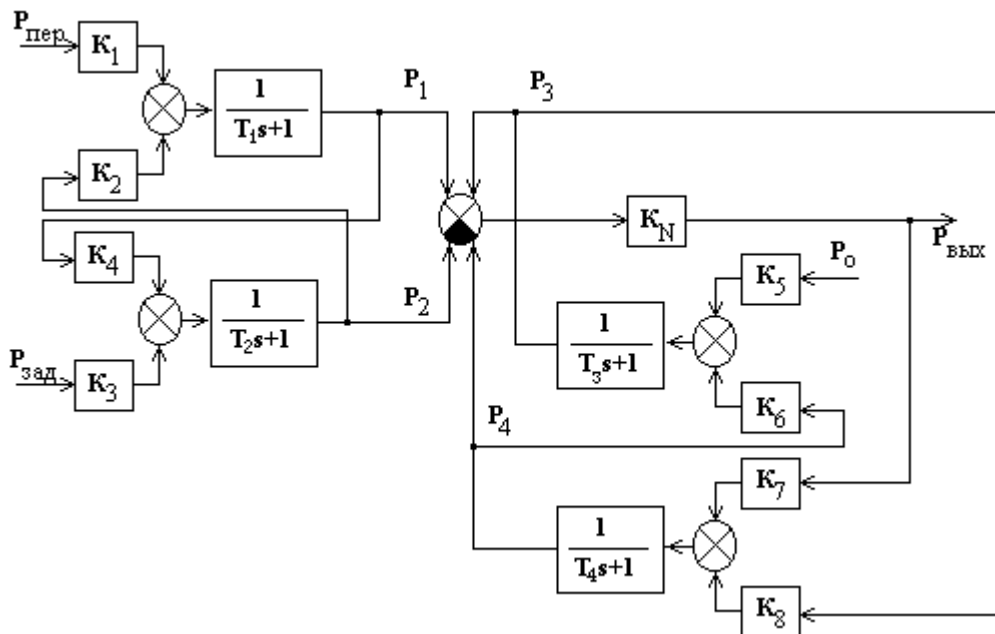


Рис.2.11

Коэффициенты передачи пропорциональных звеньев на рис.2.11 вычисляются из соотношений (1.15), а постоянные времени $T_1 - T_4$ – из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \frac{V_B M}{R\Theta(\alpha_1 + \beta_1)}; & T_2 &= \frac{V_B M}{R\Theta(\alpha'_1 + \beta_1)}; \\ T_3 &= \frac{V_\Gamma M}{R\Theta(\alpha_2 + \beta_2)}; & T_4 &= \frac{V_D M}{R\Theta(\alpha'_2 + \beta_2)}. \end{aligned} \right\} (2.8)$$

Учитывая, что $\alpha_1 = \alpha'_1$, $\alpha_2 = \alpha'_2$ и $V_B = V_\Gamma = V_D$, можно заключить, что:

$$K_1 = K_3; K_2 = K_4; K_5 = K_7; K_6 = K_8; T_1 = T_2; \text{ и } T_3 = T_4. (2.9)$$

С учетом этих равенств структурная схема регулятора будет выглядеть следующим образом:

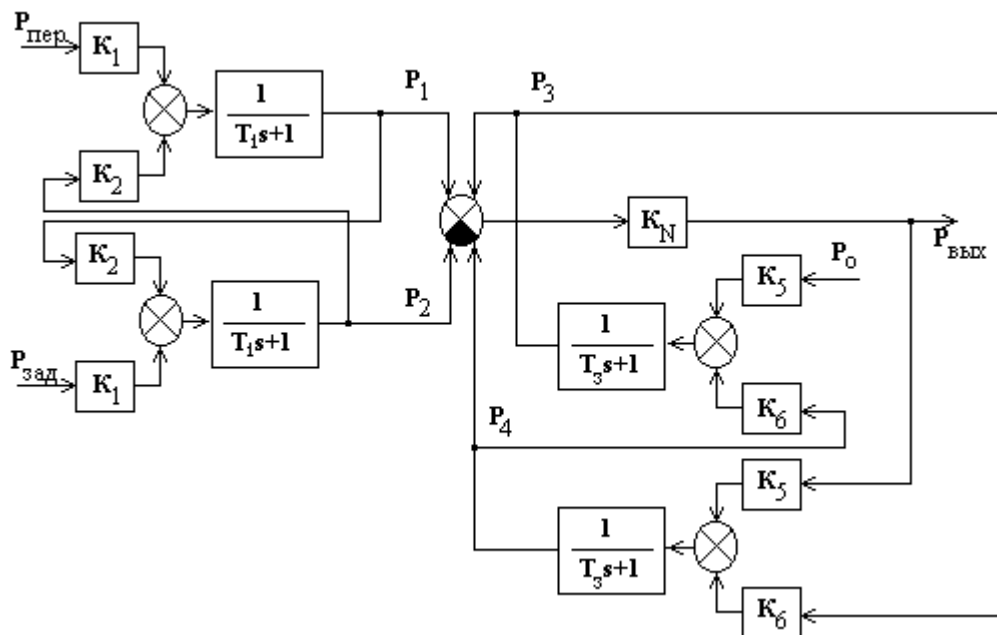


Рис.2.12

4. Упрощение полученной структурной схемы проведем путем преобразования ее к виду:

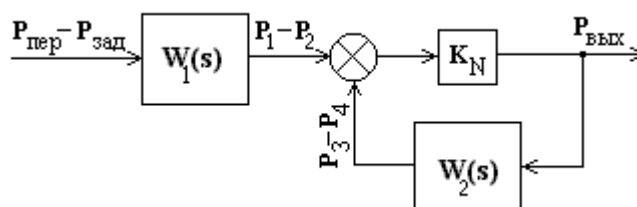


Рис.2.13

Давление контрольной точки P_0 в процессе функционирования регулятора является константой и не оказывает влияния на динамику регулятора, поэтому соответствующий вход на рис.2.13 отсутствует.

Определим передаточные функции укрупненных блоков структурной схемы (рис.2.13) $W_1(s)$ и $W_2(s)$. Для этого проанализируем фрагменты структурной схемы, соответствующие этим блокам и изображенные на рис.2.14.

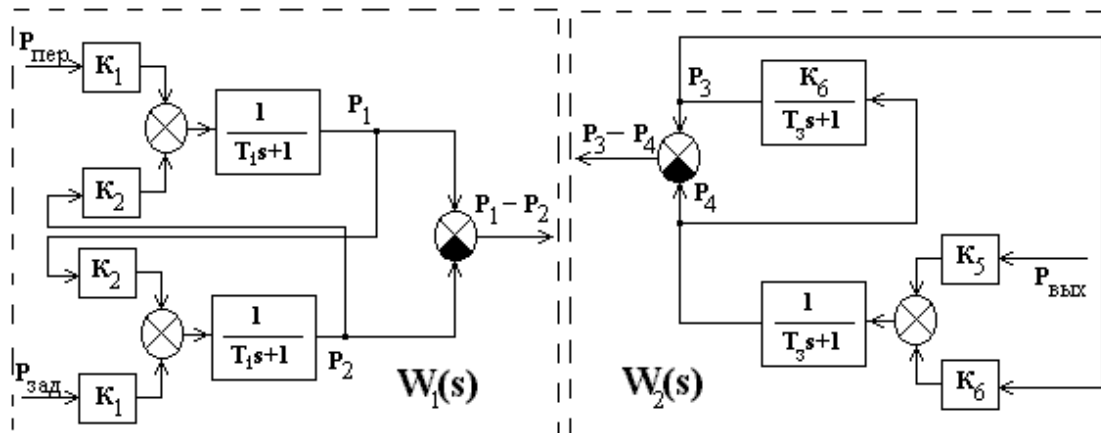


Рис.2.14.

Поскольку входное давление P_0 в процессе отработки закона регулирования не меняется, поэтому соответствующий вход на структурной схеме (рис.2.12) исключаем. Найдем передаточную функцию $W_1(s)$ по каналу $(P_{пер} - P_{зад}) \rightarrow (P_1 - P_2)$ из системы операторных уравнений (2.10):

$$\left. \begin{aligned} \tilde{P}_1 &= (K_1 \tilde{P}_{пер} + K_2 \tilde{P}_2) \frac{1}{T_1 s + 1} \\ \tilde{P}_2 &= (K_1 \tilde{P}_{зад} + K_2 \tilde{P}_1) \frac{1}{T_1 s + 1} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

где надстрочный знак «~» является символом преобразования переменных по Лапласу. Вычитая в (2.10) из первого уравнения второе, получим:

$$\begin{aligned} (\tilde{P}_1 - \tilde{P}_2) \left(1 + \frac{K_2}{T_1 s + 1}\right) &= (\tilde{P}_{пер} - \tilde{P}_{зад}) \frac{K_1}{T_1 s + 1} \quad \text{или} \\ (\tilde{P}_1 - \tilde{P}_2) (T_1 s + 1 + K_2) &= (\tilde{P}_{пер} - \tilde{P}_{зад}) K_1. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Исходя из (2.11), запишем передаточную функцию $W_1(s)$:

$$W_1(s) = \frac{\tilde{P}_1 - \tilde{P}_2}{\tilde{P}_{пер} - \tilde{P}_{зад}} = \frac{K_1}{T_1 s + 1 + K_2}. \quad (2.12)$$

В знаменателе выражения (2.12) вынесем за скобки множитель $(1 + K_2)$, обозначим постоянную времени $\frac{T_1}{1 + K_2}$, как $T_{вх}$ и запишем

передаточную функцию $W_1(s)$ в окончательном виде:

$$W_1(s) = \frac{K_1}{(1+K_2)(T_{\text{вх}}s+1)}. \quad (2.13)$$

Передаточную функцию $W_2(s)$ по каналу $P_{\text{вых}} \rightarrow (P_3 - P_4)$ найдем из системы операторных уравнений (2.14):

$$\left. \begin{aligned} \tilde{P}_3 &= K_6 \tilde{P}_4 \frac{1}{T_3 s + 1} \\ \tilde{P}_4 &= (K_5 \tilde{P}_{\text{вых}} + K_6 \tilde{P}_3) \frac{1}{T_3 s + 1} \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Проведя в этой системе преобразования, аналогичные (2.11 – 2.13) и обозначив постоянную времени $\frac{T_3}{1+K_6}$, как $T_{\text{ос}}$, запишем $W_2(s)$ в виде:

$$W_2(s) = - \frac{K_5}{(1+K_6)(T_{\text{ос}}s+1)}. \quad (2.15)$$

Согласно рис.2.13 передаточная функция регулятора по каналу $(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}}) \rightarrow P_{\text{вых}}$ будет иметь вид:

$$W(s) = \frac{W_1(s)K_N}{1-K_N W_2(s)}. \quad (2.16)$$

После деления числителя и знаменателя на K_N и приравнивания к нулю слагаемого $\frac{1}{K_N}$ получим:

$$W(s) = - \frac{W_1(s)}{W_2(s)} = \frac{K_1(1+K_6)(T_{\text{ос}}s+1)}{K_5(1+K_2)(T_{\text{вх}}s+1)} = K_p \frac{(T_{\text{ос}}s+1)}{(T_{\text{вх}}s+1)}. \quad (2.17)$$

Выражение (2.17) является искомой передаточной функцией регулятора, учитывающей как формирование алгоритма регулирования, так и неидеальность элементов схемы.

5. Передаточная функция идеального регулятора согласно (1.23) имеет вид:

$$W_{\text{ид}}(s) = K_p = \frac{K_1(1+K_6)}{K_5(1+K_2)}, \quad (2.18)$$

таким образом, балластная составляющая передаточной функции, учитывающая наличие в схеме регулятора паразитных инерционных звеньев, будет выглядеть, как:

$$W_{\delta}(s) = \frac{T_{oc}s+1}{T_{вх}s+1} \quad (2.19)$$

Для оценки динамической погрешности реализации закона регулирования следует построить амплитудно-частотные $A(\omega)$ и фазо-частотные $\varphi(\omega)$ характеристики идеального и реального регуляторов для заданного значения коэффициента передачи K_p . Выражения для $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ идеального П – регулятора, хорошо известные из теории управления, запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} A_{ид}(\omega) &= K_p ; \\ \varphi_{ид}(\omega) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

Частотные характеристики реального регулятора выводятся из (2.17) по традиционной в теории управления методике:

$$\left. \begin{aligned} A_p(\omega) &= K_p \sqrt{\frac{1+T_{oc}^2 \omega^2}{1+T_{вх}^2 \omega^2}} ; \\ \varphi_p(\omega) &= \arctg \frac{(T_{oc} - T_{вх})\omega}{1+T_{oc} T_{вх} \omega^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

При известном значении K_p следует определить постоянные времени $T_{вх}$ и T_{oc} из уравнений (1.15) и (2.8), а затем построить графики соответствующих зависимостей. Пример таких построений приведен на рис.2.15.

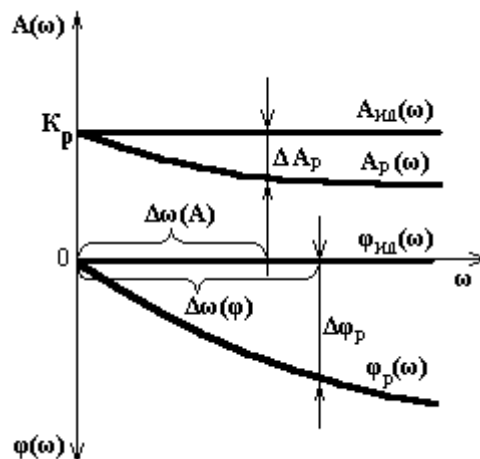


Рис.2.15. Пример частотных характеристик идеального и реального регуляторов.

На рис.2.15 указаны диапазоны частот входного рассогласования, в которых динамическая погрешность регулятора не превышает установленных пределов ($\Delta A_p \leq 0,1K_p$ и $\Delta \varphi_p \leq 15^\circ$). Определяющим является тот диапазон частот, в котором оба ограничения выполняются.

Пример 5.

Проанализировать динамику ПИ – регулятора ФР0091. Получить передаточную функцию регулятора по каналу $(P_{пер} - P_{зад}) \rightarrow P_{вых}$; оценить динамическую погрешность реализации закона регулирования. Принципиальная схема регулятора ФР0091 приведена на рис.2.16.

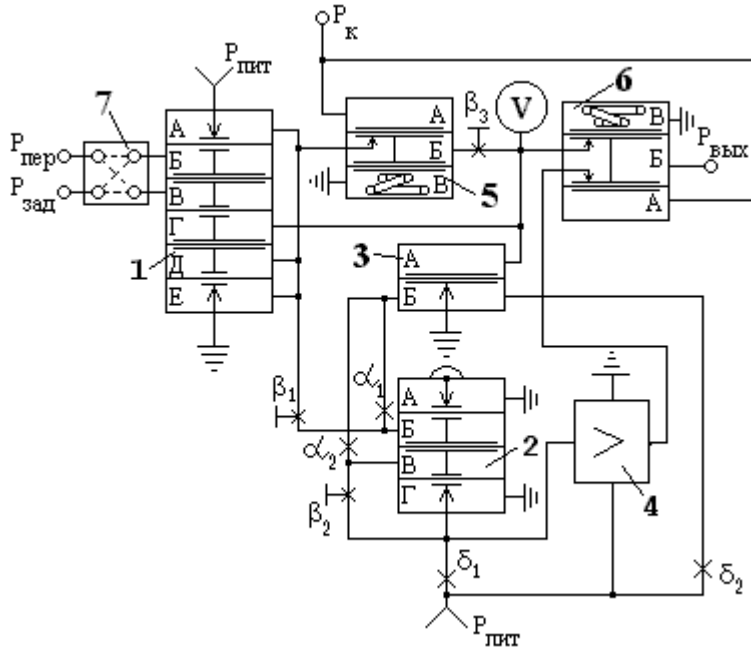


Рис. 2.16. Принципиальная схема ПИ – регулятора ФР 0091.

1. Принимаем общепринятые при анализе пневматических схем допущения и упрощаем принципиальную схему. С целью упрощения исключим из принципиальной схемы следующие элементы: маломощный повторитель 3, усилитель мощности 4, отключающие реле 5 и 6, переключатель вида действия 7.

После сделанных упрощений схема регулятора примет вид:

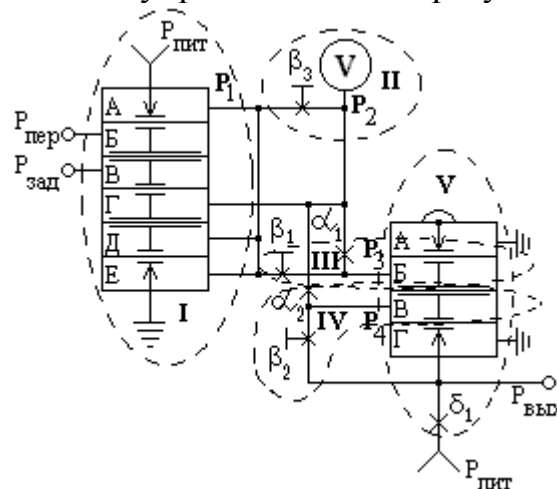


Рис.2.17. Упрощение принципиальной схемы ФР 0091 и выделение функциональных групп элементов.

2. Выделяем на упрощенной принципиальной схеме группы элементов, которые могут быть представлены в виде простейших динамических структур, представленных на рис.2.1. Состав выделенных функциональных групп и список входных и выходных давлений для каждой выделенной группы представлены в табл.2.3.

Таблица 2.2

№	Группа (элементы)	Входы	Выходы
I	Элемент сравнения 1	$P_{пер}, P_{зад}, P_2, P_1$	P_1
II	Инерционное звено β_3, V	P_1	P_2
III	Дроссельный сумматор $\alpha_1 \beta_1, V_B$	P_1, P_2	P_3
IV	Дроссельный сумматор $\alpha'_2 \beta_2, V_D$	$P_{вых}, P_2$	P_4
V	Элемент сравнения 2	P_3, P_4	$P_{вых}$

3. Представим выделенные группы элементов в виде эквивалентных динамических структур (рис.2.18):

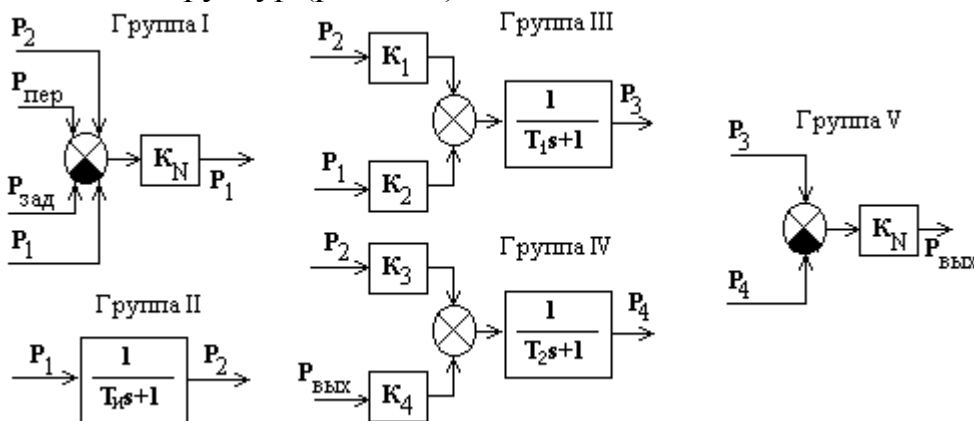


Рис.2.18.

Объединим изображенные на рис.2.18 фрагменты в структурную схему:

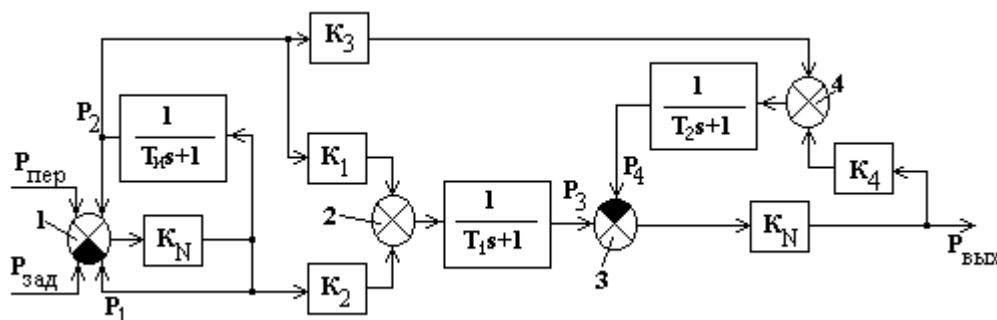


Рис.2.19. Структурная схема регулятора ФР 0091.

Коэффициенты передачи и постоянные времени блоков структурной

схемы могут быть вычислены из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1}; K_2 = \frac{\beta_1}{\alpha_1 + \beta_1}; K_3 = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2}; K_4 = \frac{\beta_2}{\alpha_2 + \beta_2}; \\ T_1 &= \frac{V_B M}{R\Theta(\alpha_1 + \beta_1)}; T_2 = \frac{V_B M}{R\Theta(\alpha_2 + \beta_2)}; T_{\text{и}} = \frac{VM}{R\Theta\beta_3}. \end{aligned} \right\} (2.22)$$

4. Проведем упрощение структурной схемы и выведем передаточную функцию по каналу $(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}}) \rightarrow P_{\text{вых}}$. Для этого преобразуем структурную схему к виду:

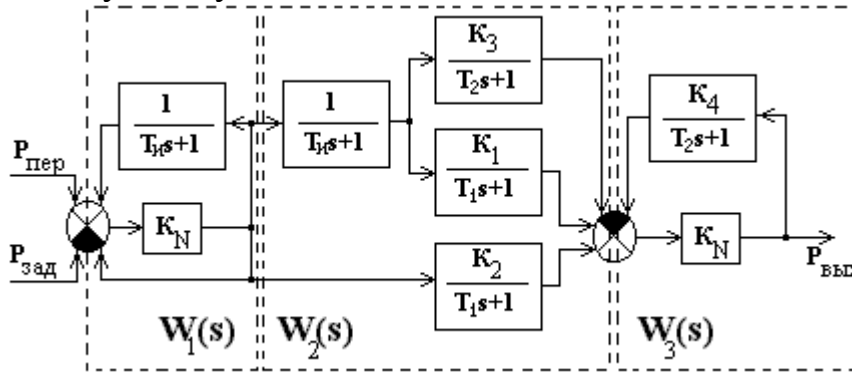


Рис.2.20.

Проведенные преобразования заключаются в переносе связей соответствующих блоков структуры со 2-го и 4-го сумматоров (рис.2.19) на 3-й и с выхода специально организованного инерционного звена на его вход. Далее выделяем в полученной структуре три последовательно соединенных участка и представляем передаточную функцию регулятора, как

$$W(s) = W_1(s)W_2(s)W_3(s). \quad (2.23)$$

Запишем выражения для $W_1(s)$, $W_2(s)$ и $W_3(s)$, используя правила блок-алгебры передаточных функций:

$$W_1(s) = \frac{K_N}{1 + K_N \left(1 - \frac{1}{T_{\text{и}}s+1} \right)}; \quad (2.24)$$

$$W_2(s) = \frac{1}{T_{\text{и}}s+1} \left(\frac{K_1}{T_1s+1} - \frac{K_3}{T_2s+1} \right) + \frac{K_2}{T_1s+1}; \quad (2.25)$$

$$W_3(s) = \frac{K_N}{1 + K_N \frac{K_4}{T_2s+1}}. \quad (2.26)$$

Упрощение этих выражений начнем с (2.24).

$$W_1(s) = \frac{1}{1 - \frac{1}{T_{\text{и}}s+1}} = \frac{T_{\text{и}}s+1}{T_{\text{и}}s}; \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} W_2(s) &= \frac{K_2}{T_1s+1} + \frac{K_1}{(T_1s+1)(T_{\text{и}}s+1)} - \frac{K_3}{(T_2s+1)(T_{\text{и}}s+1)} = \\ &= \frac{K_2T_{\text{и}}s+K_2+K_1}{(T_1s+1)(T_{\text{и}}s+1)} - \frac{K_3}{(T_2s+1)(T_{\text{и}}s+1)} = \\ &= \frac{K_2T_{\text{и}}s+1}{(T_1s+1)(T_{\text{и}}s+1)} - \frac{K_3}{(T_2s+1)(T_{\text{и}}s+1)} \end{aligned} \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{Т..к. } K_1+K_2=1 \end{array}$$

И далее

$$W_2(s) = \frac{(K_2T_{\text{и}}s+1)(T_2s+1) - K_3(T_1s+1)}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_{\text{и}}s+1)}. \quad (2.28)$$

$$W_3(s) = \frac{1}{\frac{K_4}{T_2s+1}} = \frac{T_2s+1}{K_4}. \quad (2.29)$$

Перемножим выражения (2.27 – 2.29), получим:

$$\begin{aligned} W(s) &= \frac{(K_2T_{\text{и}}s+1)(T_2s+1) - K_3(T_1s+1)}{K_4T_{\text{и}}s(T_1s+1)} = \\ &= \frac{K_2T_{\text{и}}s(T_2s+1) + T_2s+1 - K_3T_1s - K_3}{K_4T_{\text{и}}s(T_1s+1)} = \\ &= \frac{K_2(T_2s+1)}{K_4(T_1s+1)} + \frac{1}{T_{\text{и}}s(T_1s+1)} + \frac{T_2 - K_3T_1}{T_{\text{и}}(T_1s+1)K_4}. \end{aligned} \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{Т..к. } 1 - K_3 = K_4 \end{array} \quad (2.30)$$

С использованием соотношения (2.22) преобразуем последнее слагаемое (2.30), введя допущение, что $\alpha_2 = \alpha_1$ и $V_B = V_B$:

$$\frac{T_2 - K_3T_1}{T_{\text{и}}(T_1s+1)K_4} = \frac{V_B M \left[\frac{1}{\alpha_2 + \beta_2} - \frac{\alpha_1}{(\alpha_2 + \beta_2)(\alpha_1 + \beta_1)} \right]}{R\Theta T_{\text{и}}(T_1s+1)K_4}$$

$$= \frac{V_B M}{R \Theta (\alpha_2 + \beta_2)} \left[1 - \frac{\alpha_1}{(\alpha_1 + \beta_1)} \right] = \frac{T_2 K_2}{T_i (T_1 s + 1) K_4}.$$

В окончательном виде передаточная функция регулятора будет иметь вид:

$$W(s) = \left\{ \frac{K_2}{K_4} \left[(T_2 s + 1) + \frac{T_2}{T_i} \right] + \frac{1}{T_i s} \right\} \frac{1}{T_1 s + 1} \quad \text{или}$$

$$W(s) = \left[\frac{K_2}{K_4} (T_{\text{экв}} s + 1) + \frac{1}{T_i s} \right] \frac{1}{T_1 s + 1}, \quad (2.31)$$

где
$$T_{\text{экв}} = \frac{T_2 T_i}{T_2 + T_i}.$$

5. Передаточная функция идеального ПИ – регулятора выглядит, как:

$$W_{\text{ид}}(s) = K_p + \frac{1}{T_i s},$$

и если положить $K_p = \frac{K_2}{K_4}$, то из (2.31) следует, что в передаточной функции регулятора ФР 0091 присутствуют две балластных составляющих – одна общая $\frac{1}{T_1 s + 1}$ и вторая индивидуальная $(T_{\text{экв}} s + 1)$ для

пропорциональной части закона регулирования. Динамическую погрешность регулятора ФР 0091 оцениваем аналогично п.5 Примера 4.

3. ПРИМЕРЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ.

3.1. Провести анализ статики, получить статические характеристики пневматических узлов (рис.3.1 – 3.5).

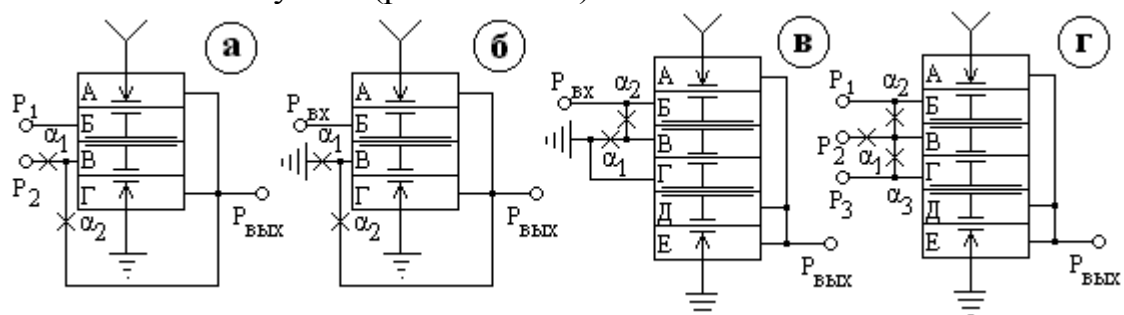


Рис.3.1.

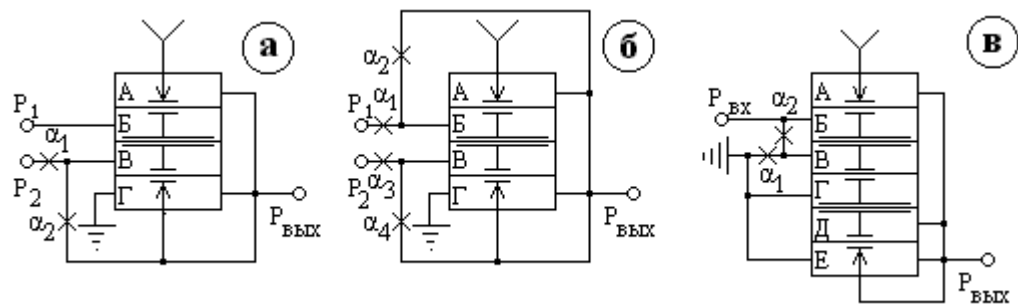


Рис.3.2.

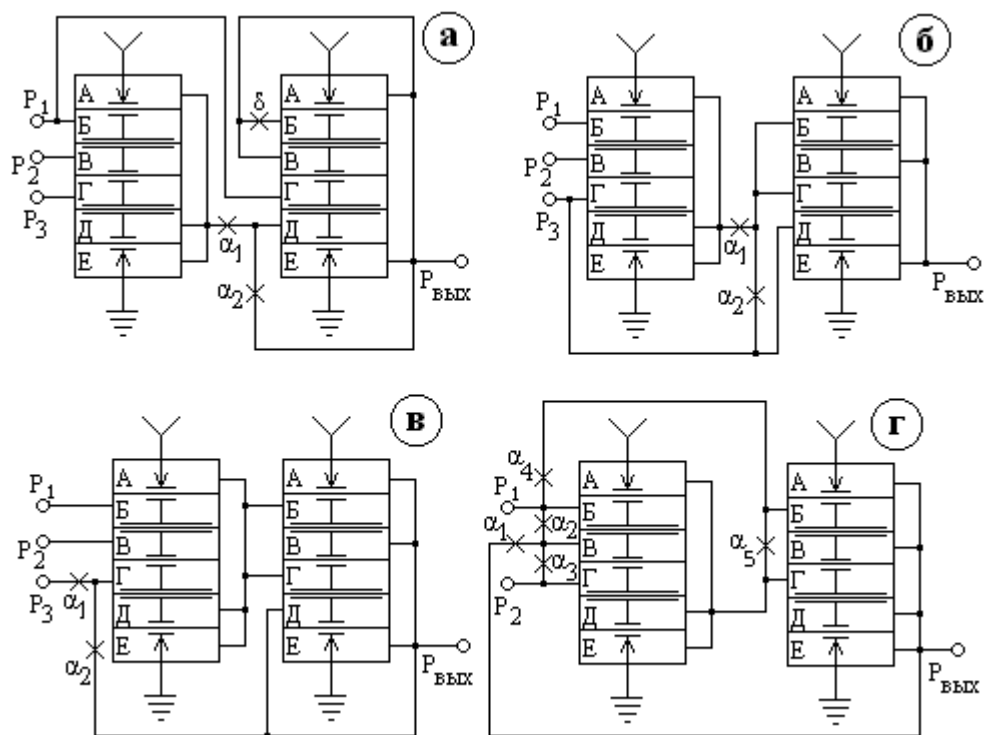


Рис.3.3.

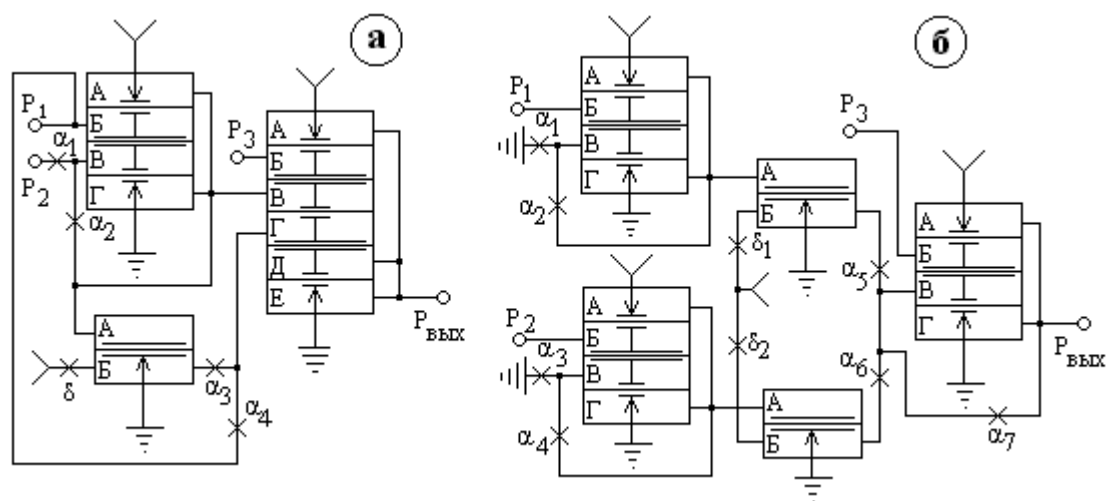


Рис.3.4.

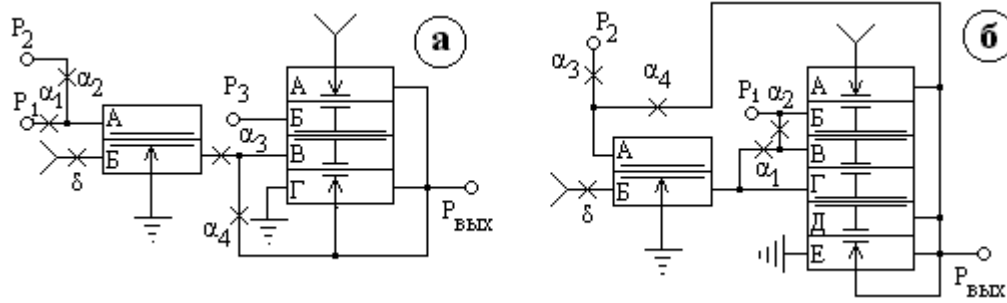


Рис.3.5.

3.2. Провести анализ динамики, получить передаточные функции пневматических узлов по каналу $P_{ВХ} \rightarrow P_{ВЫХ}$ (рис.3.6, 3.7).

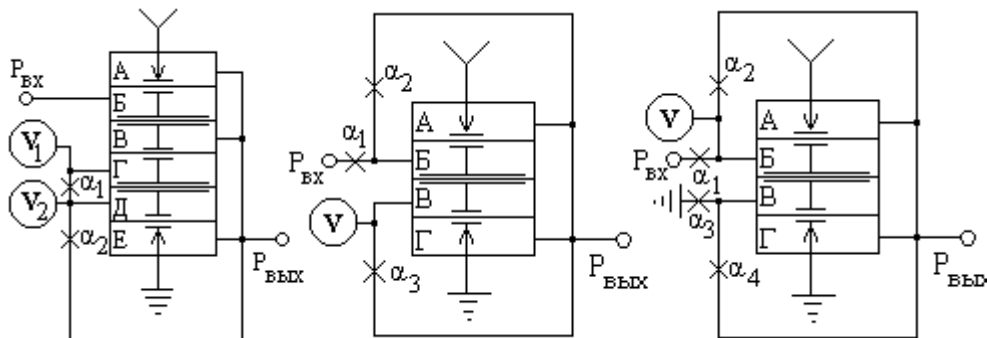


Рис.3.6.

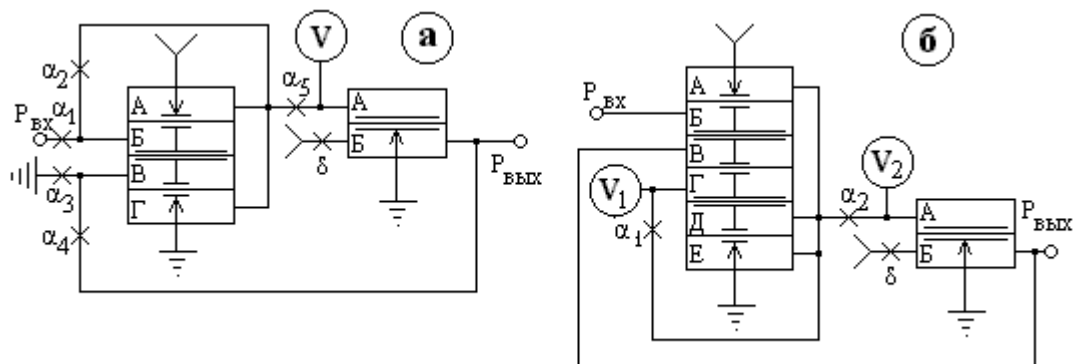


Рис.3.7.

3.3. Провести анализ динамики, получить передаточные функции пневматических регуляторов по каналу $(P_{пер} - P_{зад}) \rightarrow P_{ВЫХ}$ (рис.3.8 – 3.11).

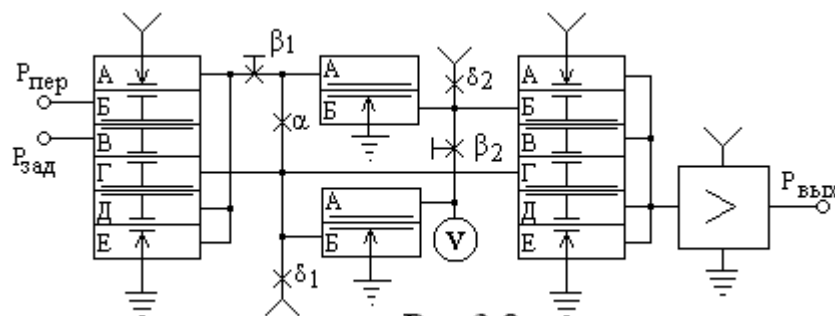


Рис.3.8

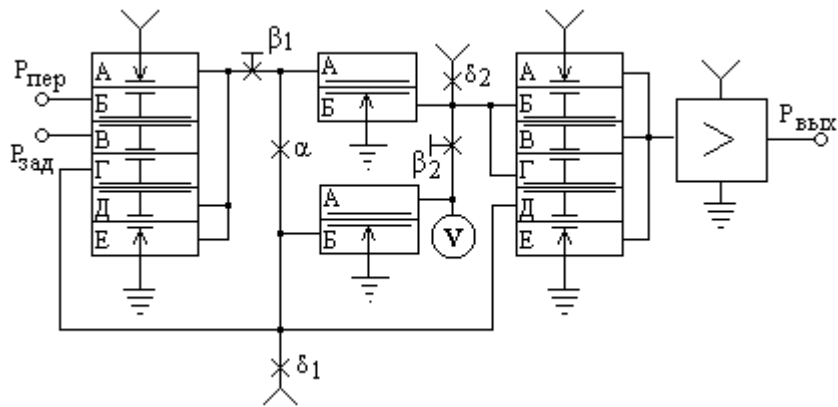


Рис.3.9

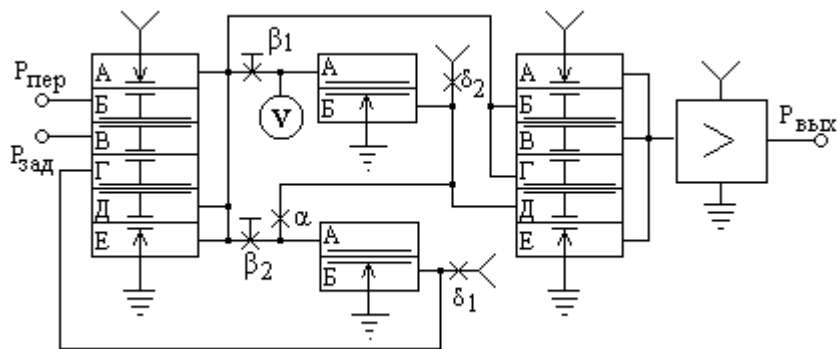


Рис.3.10

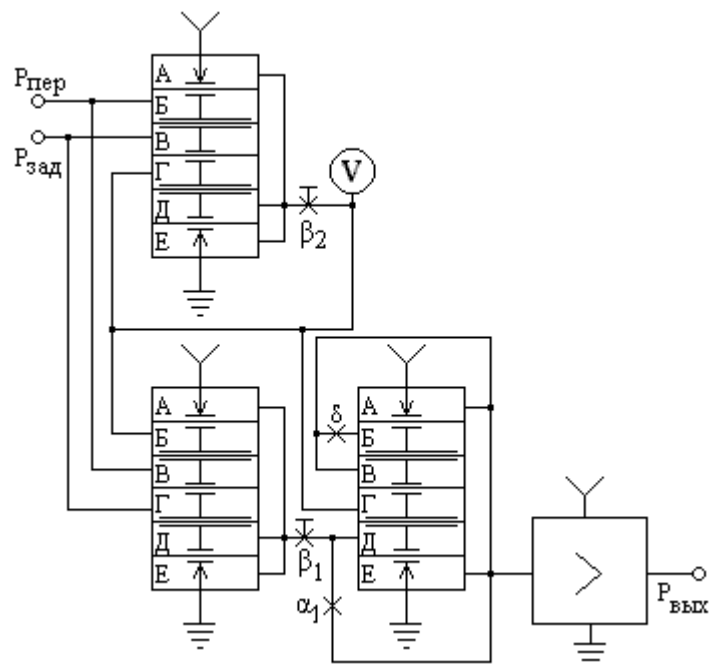


Рис.3.11.

4. СИНТЕЗ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ АНАЛОГОВЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ.

Целью синтеза аналогового пневматического узла или устройства является получение принципиальной схемы, отрабатывающей заданный алгоритм преобразования сигналов и удовлетворяющей предъявляемым требованиям и ограничениям. Алгоритм преобразования сигнала может быть задан в виде уравнения статики, уравнения динамики или передаточной функции. Дополнительные требования могут относиться к статической или динамической точности преобразования, к быстродействию, качественному или количественному составу элементов схемы, а также могут ограничивать габариты, массу и потребляемую мощность устройства. В общем случае задача синтеза (в отличие от задачи анализа) не является формальной, поскольку одним и тем же исходным данным могут соответствовать несколько принципиально различных решений. Тем не менее, процедура синтеза может быть представлена в виде определенной последовательности этапов, большинство которых являются формальными.

- 1. Формулируются или уточняются требования, предъявляемые к свойствам синтезируемой схемы и/или ограничения, накладываемые на состав и количество элементов.**
- 2. Производится преобразование исходных данных с целью выделения в алгоритме преобразования сигнала элементарных операций, реализуемых в виде типовых узлов.**

Если исходные данные представлены в виде уравнения динамики, то следует выполнить преобразование Лапласа и найти передаточную функцию синтезируемого узла. Правила преобразования исходных соотношений трудно определить заранее, однако существует несколько приемов, позволяющих достичь желаемых результатов:

- а) умножение и деление на одну и ту же величину (или одно и то же выражение);
- б) прибавление и вычитание одной и той же величины (или одного и того же выражения);
- в) использование правил блок-алгебры передаточных функций.

- 3. Выделенные элементарные операции аппроксимируются динамическими звеньями или их типовыми соединениями – образуется структурная схема синтезируемого устройства.**

При построении структурной схемы необходимо учитывать те требования и ограничения, которым должно соответствовать синтезируемое устройство. При обнаружении каких-либо несоответствий следует вернуться к п.2 и провести преобразование исходных данных каким-то другим способом.

- 4. Каждому блоку построенной таким образом структурной схе-**

мы ставится в соответствие пневматический элемент, соединение элементов или типовой узел. В итоге получается принципиальная схема синтезируемого устройства.

5. Проверяется соответствие полученной принципиальной схемы исходным данным. При обнаружении несоответствий возвращаются к п.2 данной методики.

Пример 6.

Синтезировать пневматический узел, реализующий уравнение статики

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ1}} - K P_{\text{ВХ2}}, \quad (4.1)$$

где коэффициент передачи K может принимать значения в диапазоне $K_1 \leq K \leq K_2$ при $K_1 < 1$ и $K_2 > 1$. Схема должна содержать не более одного элемента сравнения.

1. Операция умножения давления $P_{\text{ВХ2}}$ на произвольный постоянный коэффициент может быть реализована с помощью типового узла умножения на постоянный коэффициент, но в этом случае суммирование с давлением $P_{\text{ВХ1}}$ потребует использования второго элемента сравнения. Таким образом типовой узел масштабирования пневмосигнала не может быть использован.

2. Преобразуем исходную статическую характеристику для выделения элементарных операций. Представим коэффициент передачи K в виде $K = \frac{K_1}{K_2}$, где K_1 и K_2 – коэффициенты передачи дроссельного сумматора:

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ1}} - \frac{K_1}{K_2} P_{\text{ВХ2}}. \quad (4.2)$$

В уравнении (4.2) умножим и разделим $P_{\text{ВХ1}}$ на K_2 . Получим:

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{K_2 P_{\text{ВХ1}} - K_1 P_{\text{ВХ2}}}{K_2} \quad (4.3)$$

или

$$K_2 P_{\text{ВЫХ}} = K_1 P_{\text{ВХ2}} + K_2 P_{\text{ВХ1}}. \quad (4.4)$$

3. Левая часть уравнения (4.4) реализуется в виде пропорционального звена с коэффициентом передачи K_2 (рис.4.1):

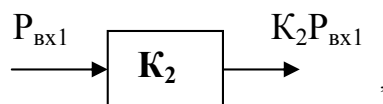


Рис.4.1.

а правая часть – в виде структуры (рис.4.2):

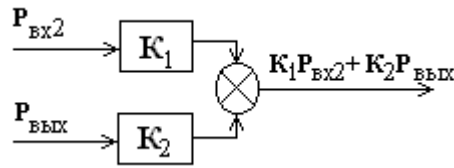


Рис.4.2.

Равенство левой и правой частей уравнения (4.4) обеспечивается подачей результирующих давлений на входы симметрично включенного элемента сравнения. Общая структурная схема синтезируемого узла принимает вид (рис.4.3):

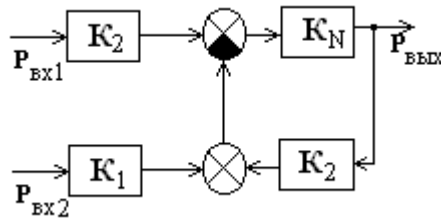


Рис.4.3.

4. В соответствии с полученной структурной схемой строим принципиальную схему (рис.4.4):

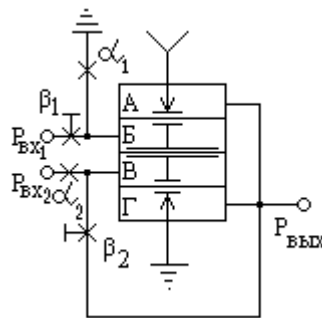


Рис.4.4.

В качестве примечания следует указать, что работоспособность данной схемы будет обеспечена в том случае, если коэффициенты передачи дроссельных сумматоров на входе P_1 и в линии обратной связи будут одинаковы:

$$\frac{\beta_1}{\alpha_1 + \beta_1} = \frac{\beta_2}{\alpha_2 + \beta_2} = K_2 \quad (4.5)$$

5. Анализ принципиальной схемы узла (рис.4.4) с учетом соотношения (4.5) дает исходную форму статической характеристики узла в виде (4.4), что свидетельствует о достижении поставленной цели.

Пример7. Синтезировать схему пневматического ПД-регулятора, обрабатывающего уравнение динамики:

$$P_{\text{ВЫХ}} = K_p [(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}}) + T_{\text{п}} \frac{d(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}})}{dt}] + P_o. \quad (4.6)$$

1. Поскольку синтезируемое устройство является регулятором, его схема должна содержать :
 - а) регулирующий узел, реализующий заданное уравнение динамики,
 - б) усилитель мощности,
 - в) отключающие реле – для блокировки выхода регулятора и управления дифференциальной составляющей закона регулирования,
 - г) задатчик давления контрольной точки.

2. Синтезируем регулирующий узел. Для этого преобразуем уравнение (4.6) с целью:

- а) получения передаточной функции по каналу $(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}}) \rightarrow P_{\text{вых}}$,
- б) получения уравнения статики.

Преобразуем (4.6) по Лапласу, приняв $P_0=0$.

$$\tilde{P}_{\text{вых}} = K_p [(\tilde{P}_{\text{пер}} - \tilde{P}_{\text{зад}}) + T_{\text{п}} s (\tilde{P}_{\text{пер}} - \tilde{P}_{\text{зад}})]. \quad (4.7)$$

Передаточная функция по каналу рассогласования будет иметь вид:

$$W(s) = \frac{\tilde{P}_{\text{вых}}}{\tilde{P}_{\text{пер}} - \tilde{P}_{\text{зад}}} = K_p (1 + T_{\text{п}} s). \quad (4.8)$$

Уравнение статики получим из уравнения (4.6), приравняв производную $\frac{d(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}})}{dt}$ к нулю:

$$P_{\text{вых}} = K_p (P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}}) + P_0. \quad (4.9)$$

3. Составляем структурную схему регулирующего узла. Для этого аппроксимируем передаточную функцию (4.8) последовательным соединением двух узлов – предварения и умножения на постоянный коэффициент (рис.4.5):

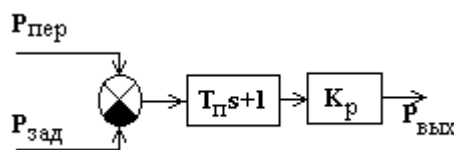


Рис.4.5.

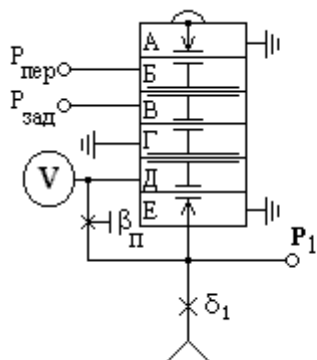


Рис.4.6.

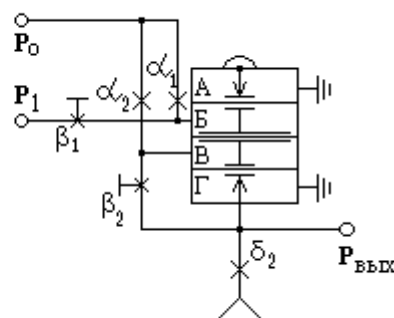


Рис.4.7.

4. Строим принципиальную схему регулирующего узла. В качестве узла предварения используем типовой пневматический узел на основе пятимембранного элемента сравнения (рис.4.6), а в качестве узла умножения на постоянный коэффициент – пропорциональную часть регулятора ФР 0091 (рис.4.7). Выходной сигнал узла предварения P_1 будет поступать на вход узла умножения на постоянный коэффициент. При соединении выбранных типовых узлов необходимо учесть, что пропорциональная часть регулятора должна формировать статическую характеристику согласно (4.9). Если же проанализировать статику узла на рис.4.7, то получим соотношение:

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_0 + \frac{K_1}{K_2}(P_1 - P_0). \quad (4.10)$$

Таким образом, чтобы привести статическую характеристику регулятора в соответствие с (4.9), необходимо сложить входное рассогласование $P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}}$ с давлением контрольной точки P_0 . Принципиальная схема регулирующего узла примет вид:

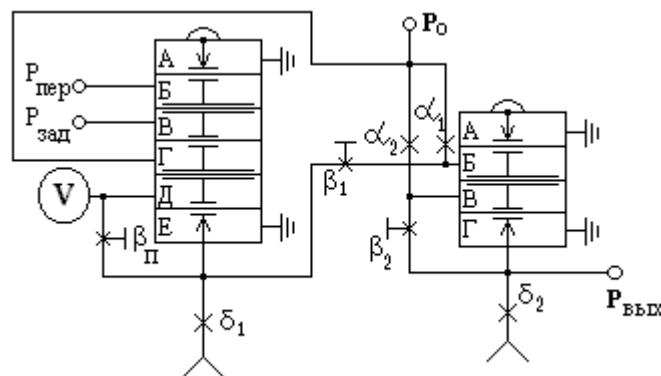


Рис.4.8.

Далее дополняем регулирующей узел недостающими элементами:

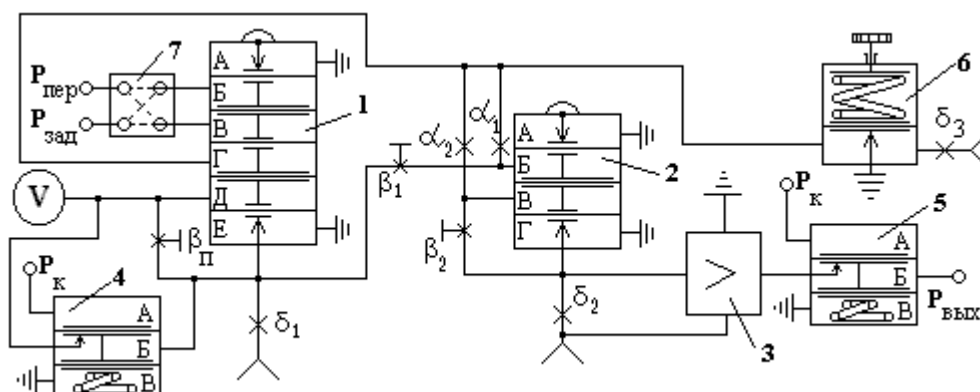


Рис.4.9.

Окончательный вариант принципиальной схемы регулятора (рис.4.9) содержит следующие элементы:

1 – узел предварения на основе пятимембранного элемента сравнения;

- 2 – узел умножения на постоянный коэффициент на основе трехмембранного элемента сравнения;
- 3 – мощный повторитель;
- 4 – отключающее реле (для шунтирования обратной связи в узле предварения при работе системы регулирования в режиме ручного дистанционного управления);
- 5 – отключающее реле (для блокировки выхода регулятора при работе системы регулирования в режиме ручного дистанционного управления);
- 6 – задатчик давления контрольной точки;
- 7 – переключатель вида действия.

Анализ полученной принципиальной схемы рекомендуется провести самостоятельно.

Пример 8. Синтезировать пневматический узел с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{T_s}{T_s + 1}. \quad (4.11)$$

Поскольку никаких дополнительных требований к свойствам узла не установлено, процедуру синтеза начинаем с преобразования исходных данных.

I Вариант. Выделяем в передаточной функции (4.11) две составляющих – дифференциальную и инерционную:

$$W(s) = (Ts) \frac{1}{Ts+1}. \quad (4.12)$$

Первая составляющая может быть реализована в виде узла дифференцирования, а вторая – в виде инерционного звена. При этом узел дифференцирования может быть получен из узла предварения в соответствии с уравнением:

$$Ts = (Ts + 1) - 1. \quad (4.13)$$

Таким образом, структурная схема синтезируемого узла будет иметь вид:

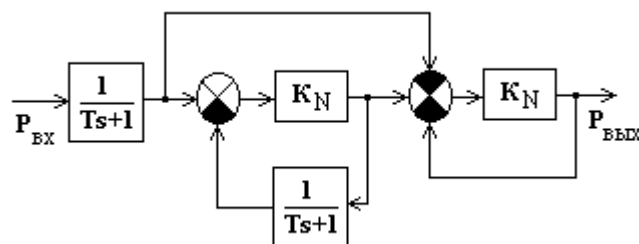


Рис.4.10.

Поставив в соответствие каждому элементу данной структуры типовой пневматический элемент или узел, получим принципиальную

схему:

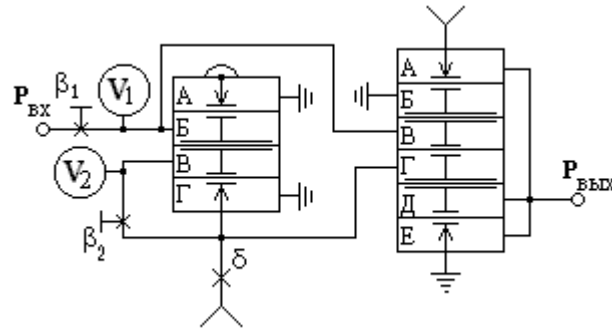


Рис.4.11.

Недостатком полученной принципиальной схемы является наличие двух органов настройки (β_1 и β_2) параметра T .

II Вариант. Делим числитель и знаменатель передаточной функции (4.11) на Ts :

$$W(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{Ts}}. \quad (4.14)$$

Данное выражение представляет собой передаточную функцию пропорционального звена с единичным коэффициентом передачи и интегрирующим звеном в цепи отрицательной обратной связи (рис.4.12).

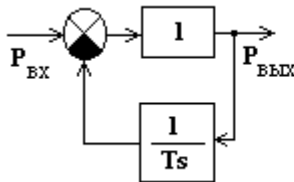


Рис.4.12.

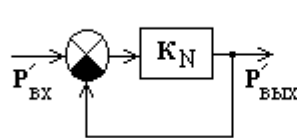


Рис.4.13.

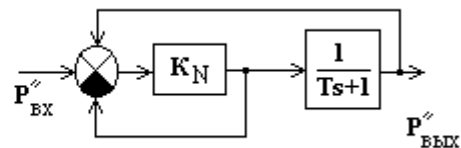


Рис.4.14.

В то же время, пропорциональное звено с единичным коэффициентом передачи реализуется в виде структуры, изображенной на рис.4.13, а интегральное звено – в виде структуры, представленной на рис.4.14. Таким образом, полная структурная схема синтезируемого узла будет иметь вид:

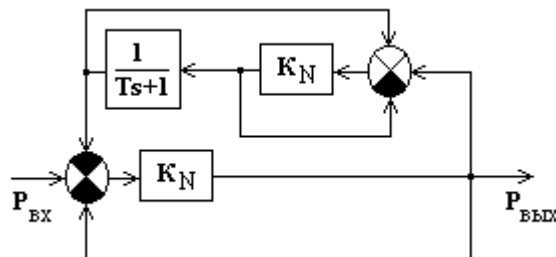


Рис.4.15.

Принципиальная схема, соответствующая данной структуре, пред-

ставлена на рис. 4.16.

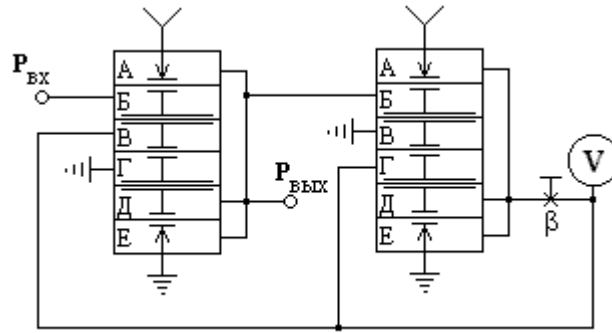


Рис.4.16.

В данном варианте принципиальной схемы настройка постоянной времени T осуществляется с помощью одного регулируемого дросселя β .

5. ПРИМЕРЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО СИНТЕЗА.

1. Синтезировать пневматический узел, отрабатывающий уравнение статики:

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ1}} + 0,5P_{\text{ВХ2}}. \quad (5.1)$$

Схема не должна содержать дросселей.

2. Синтезировать пневматический узел, отрабатывающий уравнение статики:

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ1}} + KP_{\text{ВХ2}}. \quad (5.2)$$

Схема должна содержать не более одного элемента сравнения. Коэффициент передачи K должен настраиваться в пределах $1 \leq K \leq K_{\text{max}}$.

3. Синтезировать пневматический узел, отрабатывающий уравнение статики:

$$P_{\text{ВЫХ}} = K(P_{\text{ВХ1}} - P_{\text{ВХ2}}) + P_{\text{ВХ3}}. \quad (5.3)$$

Схема должна содержать не более одного дроссельного сумматора.

4. Синтезировать пневматический узел, отрабатывающий уравнение статики:

$$P_{\text{ВЫХ}} = K_1(P_{\text{ВХ1}} - P_{\text{ВХ2}}) + K_2(P_{\text{ВХ3}} - P_{\text{ВХ4}}). \quad (5.4)$$

5. Синтезировать пневматический узел, отрабатывающий уравнение статики:

$$P_{\text{ВЫХ}} = K(P_{\text{ВХ1}} + P_{\text{ВХ2}}) - P_{\text{ВХ3}}. \quad (5.5)$$

6. Синтезировать пневматический узел, отрабатывающий уравнение статики:

$$P_{\text{ВЫХ}} = K_1(P_{\text{ВХ1}} + P_{\text{ВХ2}}) - K_2(P_{\text{ВХ3}} + P_{\text{ВХ4}}). \quad (5.6)$$

7. Синтезировать пневматический узел, реализующий передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{T_1 s}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}. \quad (5.7)$$

Предусмотреть возможность независимой настройки T_1 и T_2 .

8. Синтезировать пневматический узел, реализующий передаточную функцию:

$$W(s) = K \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}. \quad (5.8)$$

Параметр K должен изменяться в пределах $1 \leq K \leq K_{\text{max}}$.

9. Синтезировать пневматический узел, реализующий передаточную функцию:

$$W(s) = K \frac{T_s}{T_s + 1}. \quad (5.9)$$

Параметр K должен настраиваться в пределах $0 \leq K \leq 1$.

10. Синтезировать пневматический узел, реализующий передаточную функцию:

$$W(s) = 1 + \frac{1}{T_s}. \quad (5.10)$$

11. Синтезировать пневматический узел, реализующий передаточную функцию:

$$W(s) = 1 + T_s + \frac{1}{T_s}. \quad (5.11)$$

12. Синтезировать пневматический узел, реализующий передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{1 - T_s}{1 + T_s}. \quad (5.12)$$

Схема должна содержать не более одного элемента сравнения.

13. Синтезировать схему пневматического И-регулятора с передаточной функцией по каналу $(P_{\text{пер}} - P_{\text{зад}}) \rightarrow P_{\text{вых}}$, равной $W_p(s) = \frac{1}{T_{\text{И}} s}$. (5.13)

14. Синтезировать пневматический узел, реализующий передаточную функцию:

$$W(s) = K - \frac{1}{T_s}. \quad (5.14)$$

15. Синтезировать пневматический узел, реализующий передаточную функцию:

$$W(s) = K - T_s + \frac{K}{T_s}. \quad (5.15)$$

16. Синтезировать пневматический узел, реализующий передаточную функцию:

$$W(s) = T_s - 1. \quad (5.16)$$

Список литературы

1. Балакирев В.С., Софиев А.Э. Применение средств пневмо- и гидроавтоматики в химических производствах. М.: Химия, 1984. 192 с.
2. Пневматические системы автоматизации технологических процессов. РМ – 45 – 77 . М.: Проектмонтажавтоматика, 1977. 160 с.
3. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / под ред. А.С.Клюева. М.: Энергоатомиздат, 1989. 368 с.
4. Технические средства пневматических и электронных систем автоматического регулирования: Методические указания к выполнению курсовой работы по курсу «Технические средства автоматизации» для студентов специальности 21.02.00./ Иван. гос. Хим.-технол. академ.; Сост. А.П.Самарский. Иваново, 1996. 56 с.
5. Берендс.Т.К. и др. Элементы и схемы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1968. 205.с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Анализ статики принципиальных схем аналоговых пневматических устройств	3
2. Анализ динамики принципиальных схем аналоговых пневматических устройств	10
3. Примеры для самостоятельного анализа принципиальных схем	27
4. Синтез принципиальных схем аналоговых пневматических устройств	31
5. Примеры для самостоятельного синтеза.	38
Список литературы.	39

Техн. редактор Г.В.Куликова

Подписано в печать 29.03.04. Формат 60×84 1/16. Бумага писчая.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 2,58.
Тираж 100 экз. Заказ

Ивановский государственный химико-технологический университет
153460, г. Иваново, пр. Ф.Энгельса, 7.