

**Министерство образования и науки РФ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

Днепродзержинский государственный технический университет

«Петрозаводский государственный университет»  
Кольский филиал

«Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»  
Новомосковский институт

**В.Н. БОГАТИКОВ, Л.В. ДРАНИШНИКОВ, А.Е. ПРОРОКОВ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Апатиты

2011

УДК 681.5  
ББК 32.965в6  
Б 73

Авторы:

Богатиков В. Н., заведующий кафедрой автоматики и электропривода КФ Петр ГУ  
Дранишников Л. В., профессор кафедры программного обеспечения Днепродзержинского  
государственного технического университета  
Пророков А. Е., заведующий кафедрой прикладной информатики Новомосковского института  
Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева

Рецензент:

д-р техн. наук, главный научный сотрудник ИИММ КНЦ РАН Горохов А.В.

**Богатиков, В.Н.** Моделирование систем автоматического регулирования технологических процессов: методическое пособие / **В.Н. Богатиков, Л.В. Дранишников, А.Е.Пророков.** - Апатиты: Изд-во КФ ПетрГУ, 2011. – 19 с.

Освещены вопросы применения инструментальных средств системного моделирования систем автоматического регулирования технологических процессов, построенные на основе среды MATLAB Simulink.

Предназначено для студентов направлений бакалавриата (профилей) – «Информатика и вычислительная техника», «Информационные системы» и «Электроэнергетика и электротехника» (профиль – «Электропривод и автоматика»), а также специальностей – «Автоматизированные системы обработки информации и управления», «Информационные системы и технологии» и «Электропривод и автоматика промышленных установок и комплексов».

Методическое пособие полезно лицам, занимающимся разработкой систем управления технологическими процессами.

Ил. 19. Библиогр.: 5 назв.

УДК 681.5  
ББК 32.965в6

© Петрозаводский  
государственный университет  
Кольский филиал, 2011

© Днепродзержинский  
государственный технический  
университет, 2011

© Российский химико–  
технологический университет  
им. Д. И. Менделеева  
Новомосковский институт, 2011

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	4
<b>1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МОДЕЛИРОВАНИИ САР .....</b>	<b>5</b>
<b>2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ САР .....</b>	<b>7</b>
2.1 БЕЗЫНЕРЦИОННОЕ ИЛИ УСИЛИТЕЛЬНОЕ ЗВЕНО .....	8
2.2 ИНЕРЦИОННОЕ ЗВЕНО 1-ГО ПОРЯДКА .....	8
2.3 ИНЕРЦИОННОЕ ЗВЕНО 2-ГО ПОРЯДКА .....	9
<b>3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ .....</b>	<b>9</b>
3.1 ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР (П-РЕГУЛЯТОР) .....	10
3.2 ИНТЕГРАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР .....	10
3.3 ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР (ПИ-РЕГУЛЯТОР) .....	10
3.4 ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР (Д-РЕГУЛЯТОР) .....	11
3.5 ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ .....	11
<b>4 ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ .....</b>	<b>12</b>
УПРАЖНЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ .....	16
ЛИТЕРАТУРА .....	18

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание высокоэффективных и модернизация действующих технологических процессов не мыслима без создания систем управления. Современные технические решения в средствах автоматизации занимают особое место в системе подготовки специалистов по специальностям:– «Автоматизированные системы обработки информации и управления», «Информационные системы и технологии» и «Электропривод и автоматика промышленных установок и промышленных комплексов», а также для студентов направлений бакалавриата (профилей) – «Информатика и вычислительная техника», «Информационные системы» и «Электроэнергетика и электротехника» (профиль – «Электропривод и автоматика»).

Данное методическое пособие является продолжением курса «Теория автоматического управления» и дополняет курс «Теоретические основы автоматизированного управления», формирует профессиональное мировоззрение будущих инженеров, и, как следствие, по своему методическому назначению закладывает практические навыки синтеза систем автоматического регулирования технологическими процессами последующих курсов.

Материалы методического пособия составлены по источникам, представленным в Internet, в большом количестве различных журналов в виде отдельных статей, а также в help-описаниях к конкретным программным системам. Используются также материалы, перечисленные в конце данного пособия [1-6].

## 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МОДЕЛИРОВАНИИ САР

Системы автоматического регулирования (САР) являются частью технологического процесса. Вследствие действия возмущений, которым подвергаются переменные процесса, нарушается установленный режим работы объекта, что приводит к изменению выходных переменных. Задача регулирования объекта (объект регулирования - это отдельный технологический аппарат или несколько единичных технологических аппаратов, в котором протекает некоторый процесс) – устранение влияния возмущений, т.е. восстановление первоначальных значений выходных переменных. Автоматическое регулирование – процесс поддержания (стабилизации) или изменения по заданному закону выходных переменных объекта с помощью специальных устройств – автоматических регуляторов. Система автоматического регулирования включает взаимодействующие между собой объект регулирования и средства автоматического регулирования и представляет собой динамическую систему, описываемую дифференциальными уравнениями.

Система регулирования содержит два взаимодействующих звена: объект регулирования и регулятор, причем чаще всего система «объект - регулятор» составляет замкнутый контур регулирования (рис.1) по принципу обратной связи (одноконтурные САР).

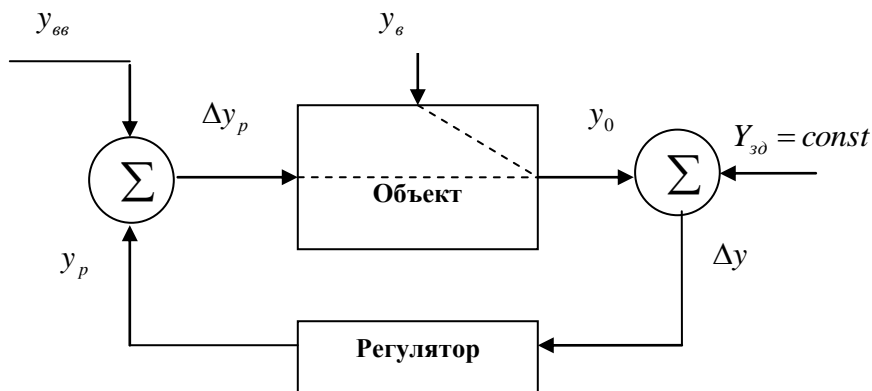


Рис.1 Принципиальная схема замкнутого контура САР по отклонению – система стабилизации

Одной из основных задач регулирования является стабилизация технологических (режимных) параметров процесса на заданных уровнях. Требуемое значение параметра  $y_{зд} = const$  подается на суммирующее устройство регулятора, где сравнивается с действительным значением параметра  $y_0 = y_0(t)$  на выходе объекта. Значение  $y_0$  называется регулируемой переменной. Разность  $\Delta y = (y_0 - y_{зд})$  - сигнал рассогласования возникает как следствие некоторых возмущающих воздействий  $y_{вв}$ .

В ответ на сигнал рассогласования регулятор вырабатывает регулирующее воздействие  $y_p$ , которое вместе с возмущением  $y_{вв}$  поступает на суммирующее устройство, образуя разность  $\Delta y_p = (y_{вв} - y_p)$ . Величина и знак времени компенсировать полностью (или до заданного уровня) действия возмущений, т.е. обеспечить  $\Delta y_p = 0$  (или  $\Delta y \leq \varepsilon$ ). Описанный принцип называется регулированием по рассогласованию или по отклонению, а использованная САР называется стабилизирующей. В качестве возмущений выступают следующие факторы:

- внешние технологические параметры  $y_{вв}$  - нарушения режима работы объекта (например, изменение температуры, объемной скорости подачи и т.д.);
- характеристики окружающей среды – изменение внешних условий (например, колебания температуры, влажности и т.д.);

- внутренние параметры объекта  $y_e$ , например непредусмотренные утечки сырья или продукта, изменения условий теплопередачи через стенку аппарата и т.п.

Системами автоматической стабилизации не исчерпываются возможности одноконтурных САР технологических процессов. Например, в системах программного регулирования регулируемая величина изменяется в соответствии с заданной функцией  $y_{zd} = F(t)$ , а следящие системы регулирования (рис.2) изменяют регулируемый параметр  $y_0$  в зависимости от значений какой-либо переменной технологического процесса  $y_{zd} = F(x_T)$ .

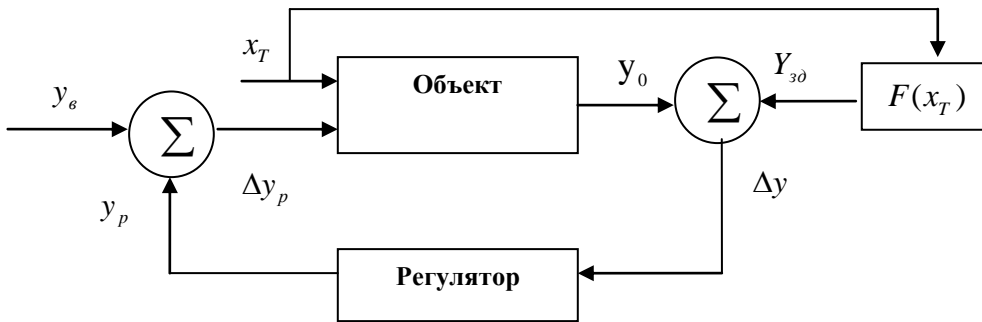


Рис.2 Принципиальная схема одноконтурной САР по отклонению – следящая система

В САР используется также принцип регулирования по возмущению. В результате применения этого принципа получают системы регулирования разомкнутого типа без обратной связи (рис.3а). Возмущение  $y_{вв}$  одновременно воспринимается объектом и регулятором. Регулятор полностью устраняет влияние возмущения путем выдачи соответствующего регулирующего воздействия  $y_p$  на входной параметр  $y_{вх}$ .

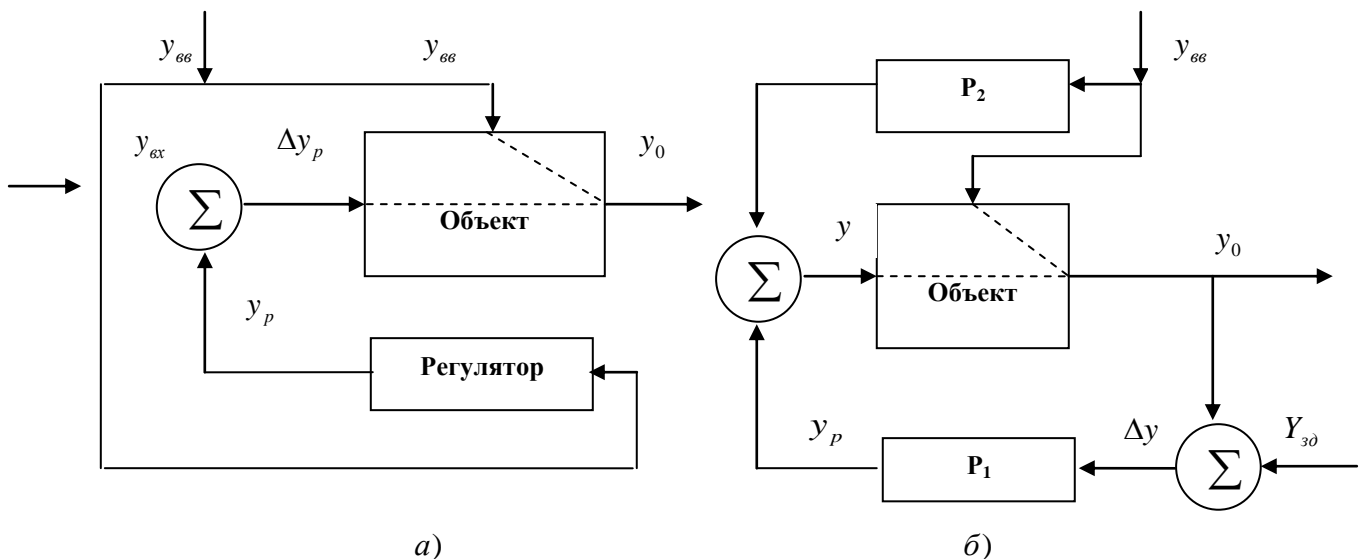


Рис.3 Принципиальная схема одноконтурной САР: а) по возмущению и б) комбинированной САР

Объединение принципов регулирования по рассогласованию и по возмущению реализовано в комбинированных САР, нашедших широкое применение (рис.3 б). Упрощенная модель САР (рис.4) содержит математическое описание объекта и регулятора.



Рис.4 Схема упрощенной модели одноконтурной САР

Для более точных расчетов и исследований САР с помощью математического моделирования необходимо учитывать влияние на поведение системы вспомогательных средств регулирования (рис.5), к которым относятся датчики Д, измеряющие значение регулируемого сигнала (расход, уровень, концентрация, температура и т.п.); исполнительные механизмы ИМ (например, электродвигатели), приводящие в действие регулирующий орган (вентиль, клапан, дроссельная заслонка и т.п.). Математическое описание переменных звеньев системы входит в общую модель САР.

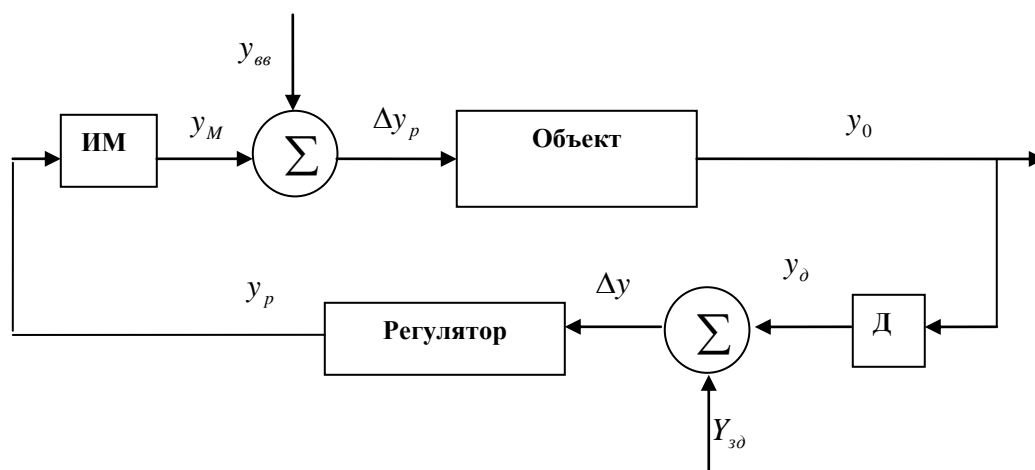


Рис.5 Схема одноконтурной САР, учитывающая вспомогательные средства регулирования

Таким образом, поведение САР в конечном счете определяется динамическими характеристиками составляющих ее элементов (звеньев). При моделировании САР на ЭВМ с помощью оболочки MatLab (пакет расширения Simulink) приняты способы описания звеньев системы с помощью дифференциальных уравнений и с помощью передаточных функций.

## 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ САР

В систему автоматического регулирования входят различные элементы, которые различают по принципу действия, конструктивному решению и т.д. Однако, несмотря на большое разнообразие, эти элементы удастся классифицировать по их динамическим свойствам. Реальные элементы системы автоматического регулирования можно с достаточной степенью точности аппроксимировать отдельными типовыми элементарными звеньями или сочетаниями нескольких таких звеньев.

Типовые звенья САР обладают рядом важных особенностей и свойств:

- параметры звена сосредоточены и не изменяются во времени;
- звено обладает свойством направленного действия, т.е. передает сигнал только в одном направлении – с входа на выход;
- динамические свойства звена характеризуются кривой разгона, которая представляет собой зависимость выходной переменной звена  $x_{вых}$  от времени в случае подачи на вход звена единичного ступенчатого воздействия  $x_{вх}$  при заданных начальных условиях;
- идеализированная характеристика звена описывается линейным дифференциальным уравнением n-го порядка или соответствующей передаточной функцией.

Рассмотрим типовые звенья САР и их модели.

## 2.1 Безынерционное или усилительное звено

Передача входного сигнала на выход происходит практически мгновенно.

Уравнение звена записывается в виде:

$$x_{вых}(t) = k_p x_{вх}(t),$$

где  $k_p$  – коэффициент передачи звена.

Для моделирования безынерционного звена в пакете расширения Simulink используют усилитель Gain (рис.6).

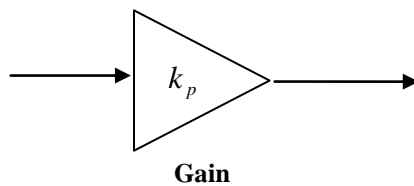


Рис.6 Схема безынерционного звена

## 2.2 Инерционное звено 1-го порядка

Инерционное, или аperiodическое, звено 1-го порядка обладает емкостью по веществу (или энергии) и сопротивлением потоку этого вещества (или энергии). Оно описывается линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка с постоянными коэффициентами:

$$T \frac{dx_{вых}}{dt} + x_{вых} = k x_{вх},$$

где  $T$  – постоянная времени аperiodического звена, равная произведению емкости на сопротивление;  $k$  – коэффициент передачи звена.

Инерционное звено 1-го порядка моделируется на интеграторе (рис.7), охваченном обратной связью. Для моделирования уравнение инерционного звена перепишем относительно производной поделив предварительно на  $T$ :

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{T} x_{вых} + \frac{k}{T} x_{вх}$$

В качестве входного сигнала используют ступенчатое возмущение. Реакцию системы на ступенчатое возмущение можно посмотреть с помощью осциллографа Scope.



## 2.3 Инерционное звено 2-го порядка

Инерционное или апериодическое звено 2-го порядка получается при последовательном соединении двух физических элементов, каждый из которых обладает емкостью и обменивается веществом (или энергией) через некоторое сопротивление.

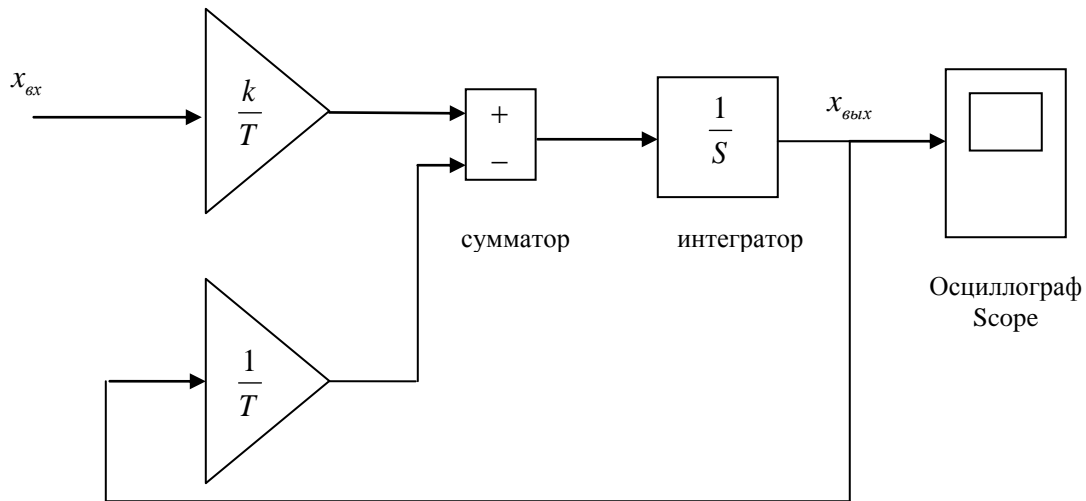


Рис.7 Схема модели инерционного звена 1-го порядка

Динамика этого звена описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка:

$$T_2^2 \frac{d^2 x_{\text{вых}}}{dt^2} + T_1 \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}$$

при условии что  $T_1 \gg 2T_2$ .

Для моделирования апериодического звена 2-го порядка уравнение приводят к виду:

$$\frac{d^2 x_{\text{вых}}}{dt^2} = \frac{k}{T_2^2} x_{\text{вх}} - \frac{1}{T_2^2} x_{\text{вых}} - \frac{T_1}{T_2^2} \frac{dx_{\text{вых}}}{dt},$$

т.е. схема модели будет состоять из сумматора с тремя входами и тремя блоками Gain, двух последовательно соединенных интеграторов и осциллографа Score.

**Колебательное звено** описывается тем же уравнением 2-го порядка и отличается от инерционного соотношением между постоянными времени:  $T_1 < 2T_2$ .

## 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Регулятор непрерывного действия – это устройство, которое при непрерывной подаче регулируемой величины на его вход непрерывно формирует на своем выходе регулирующий сигнал, соответствующий заданному закону регулирования (рис.8). При моделировании закон регулирования представляется некоторым уравнением регулятора. Рассмотрим основные типы регуляторов непрерывного действия и их модели.

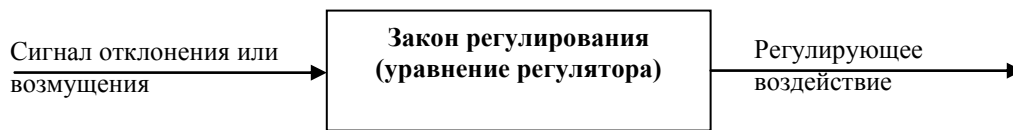


Рис.8 Схема регулятора непрерывного действия

### 3.1 Пропорциональный регулятор (П-регулятор)

Пропорциональный или статический регулятор (П-регулятор) при отклонении регулируемой величины от ее заданного значения выдает команду на перемещение регулирующего органа, пропорциональное отклонению; таким образом, величина сигнала на выходе регулятора пропорциональна входному сигналу. Закон регулирования записывается в виде:

$$y(t) = k_p x(t),$$

где  $y(t)$  – регулирующее воздействие регулятора;  $k_p$  – коэффициент передачи регулятора;  $x(t)$  – сигнал рассогласования.

Коэффициент  $k_p$  называется коэффициентом усиления регулятора. Он вычисляется как отношение изменения сигнала на выходе регулятора, принятое за 100%, к вызвавшему это изменение сигналу рассогласования.

Для моделирования П-регулятора в пакете расширения Simulink используют усилитель Gain.

### 3.2 Интегральный регулятор

Интегральный или И-регулятор работает в соответствии с уравнением:

$$y(t) = k_i \int x(t) dt,$$

где  $k_i$  – коэффициент передачи регулятора, характеризующий скорость работы исполнительного механизма.

Закон регулирования показывает, что скорость регулирующего воздействия  $dy/dt$  прямо пропорциональна сигналу рассогласования  $k_i x$ . Модель И-регулятора в Simulink состоит из последовательно соединенных блоков Gain с коэффициентом  $k_i$  и интегрирующего блока.

### 3.3 Пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор)

ПИ-регулятор образуется параллельным соединением П-регулятора и И-регулятора. Закон регулирования выражается уравнением:

$$y(t) = k_p x + k_i \int x dt = k_p \left( x + \frac{1}{T_i} \int x dt \right),$$

где  $k_p$  – статический коэффициент передачи;  $T_i$  – время изодрома.

Константа  $\frac{1}{T_i}$ , входящая в интегральную составляющую, имеет размерность 1/сек. Ее величина

характеризует время, в течение которого происходит автоматическая перестановка регулирующего органа из одного крайнего положения в другое за счет интегральной составляющей регулирующего воздействия. Таким образом, регулирующее воздействие ПИ-регулятора пропорционально сумме отклонения регулируемой величины во времени от заданной и интеграла этого отклонения.

Модель ПИ-регулятора (рис.9) состоит из 4-х блоков: двух усилителей, интегратора и сумматора, на выходе которого формируется регулирующее воздействие ПИ-регулятора.

### 3.4 Дифференциальный регулятор (Д-регулятор)

Величина выходного (регулирующего) сигнала прямо пропорциональна скорости изменения входного сигнала:

$$y(t) = k_d \frac{dx}{dt}$$

Д-регулятор обычно не используется самостоятельно, а входит как составная часть в пропорционально-дифференциальные (ПД-регулятор) и пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД- регулятор).

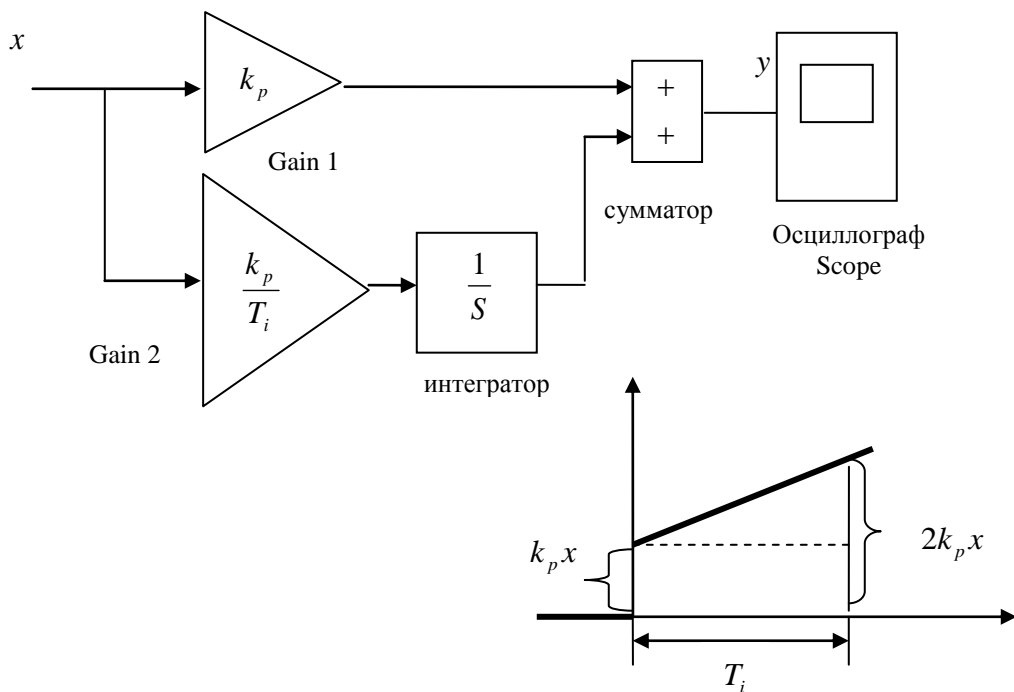


Рис.9 Схема модели ПИ-регулятора

### 3.5 Пропорционально-интегрально-дифференциальный

Регулятор (ПИД- регулятор) называют еще изодромным регулятором с предварением. Закон его регулирования описывается уравнением вида:

$$y(t) = k_p \left( x + \frac{1}{T_i} \int x dt + T_d \frac{dx}{dt} \right),$$

где  $k_p$  – коэффициент передачи регулятора;  $T_i$  – время изодрома;  $T_d$  – время предварения.

Модель ПИД-регулятора (рис.10) состоит из пяти блоков: трех усилителей, интегратора, дифференциатора и сумматора, на выходе которого формируется регулирующее воздействие ПИД-

регулятора.

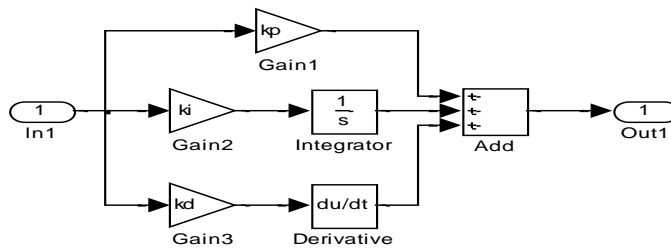


Рис.10 Схема модели ПИД-регулятора

#### 4 ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ

Понятие передаточной функции сложилось в теории систем автоматического регулирования для описания динамических свойств линейных звеньев, которые имеют сосредоточенные, конечные и постоянные во времени параметры. По определению передаточной функцией линейного звена  $W(p)$  называется отношение мгновенных сигналов на выходе  $y(p)$  и на входе  $x(p)$  звена в операторной форме:

$$w(p) = \frac{y(p)}{x(p)}$$

Дифференциальные уравнения всегда можно преобразовать в соответствующую передаточную функцию. Приведенные выше дифференциальные уравнения могут быть записаны в операторной форме путем замены производной  $d/dt$  символом  $p$ . Это позволяет свести решение дифференциального уравнения к решению алгебраического, что гораздо проще. Такое преобразование широко используется в теории автоматического регулирования.

Представим уравнение инерционного звена  $T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}$  в операторной форме  $Trx_{\text{вых}}(p) + x_{\text{вых}}(p) = kx_{\text{вх}}(p)$  или

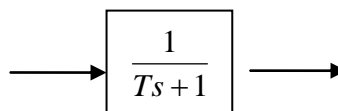
$$x_{\text{вых}}(p)(Tp + 1) = kx_{\text{вх}}(p)$$

Запишем передаточную функцию:

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{k}{Tp + 1},$$

где  $k$  – коэффициент передачи звена;  $T$  – постоянная времени звена.

В Simulink эта передаточная функция имеет вид:



Для уравнения апериодического звена 2-го порядка  $T_2^2 \frac{d^2x_{\text{вых}}}{dt^2} + T_1 \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}$  операторная форма записи имеет вид:

$$T_2^2 p^2 x_{\text{вых}}(p) + T_1 p x_{\text{вых}}(p) + x_{\text{вых}}(p) = k x_{\text{вх}}(p)$$

Передаточная функция:

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$$

Передаточные функции И-регулятора, ПИ-регулятора и ПИД-регулятора соответственно, имеют вид:

$$W(p) = \frac{k_i}{p}; \quad W(p) = \frac{k_i + k_p p}{p}; \quad W(p) = \frac{k_i + k_p p + k_d p^2}{p}$$

Таким образом, любое звено можно представить в виде передаточной функции. В пакете Simulink моделируется блоком передаточной характеристики **Transfer Fcn** (задает передаточную функцию в виде отношения полиномов, порядок числителя не должен превышать порядок знаменателя). На рис.11 показан пример моделирования колебательного звена с помощью блока **Transfer Fcn**.

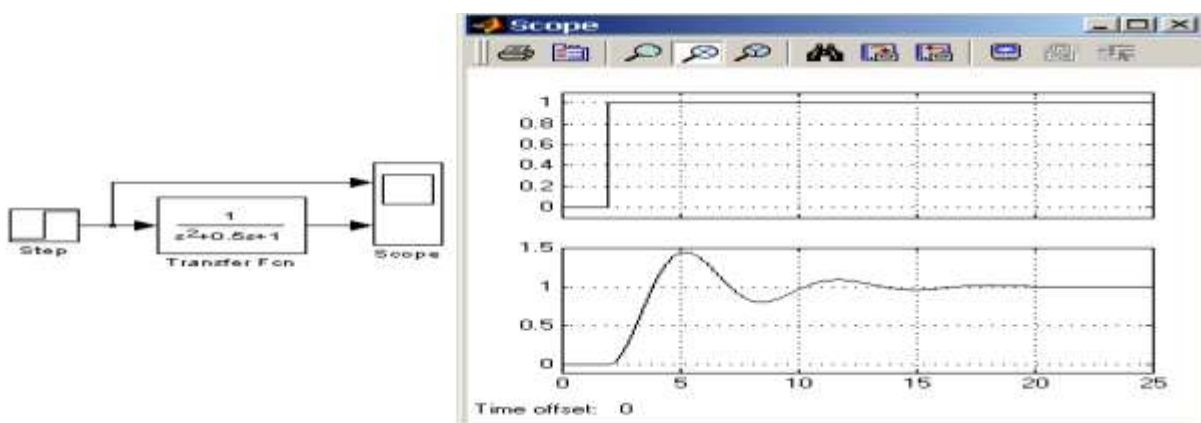


Рис.11 Пример моделирования колебательного звена

При составлении и преобразовании структурной схемы САУ передаточные функции более удобны, чем дифференциальные уравнения. Звенья системы регулирования могут быть соединены друг с другом последовательно, параллельно, звено может быть охвачено обратной связью.

Передаточная функция последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций всех звеньев:

$$w(p) = w_1(p)w_2(p) \dots w_n(p)$$

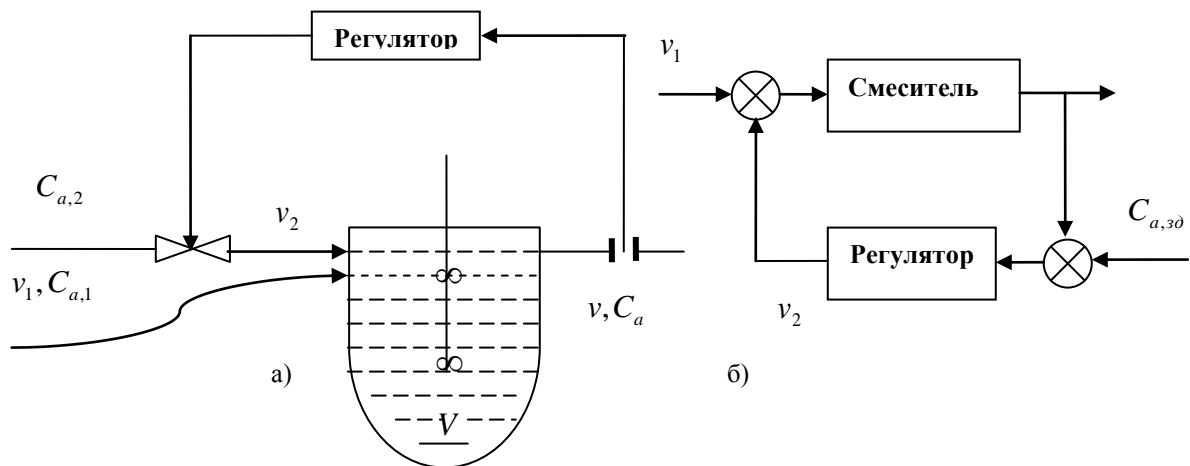
Передаточная функция параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций звеньев:

$$w(p) = w_1(p) + w_2(p) + \dots + w_n(p)$$

Передаточная функция замкнутой системы (звено с обратной связью) определяется выражением:

$$w(p) = \frac{w(p)}{1 + w(p)}$$

**Пример 1.** Регулирование концентрации смеси двух жидкостей в проточном аппарате полного перемешивания (рис.12).



**Рис.12 Регулирование концентрации в смесителе проточного типа: а) схема регулирования; б) структурная схема САР**

В емкости проточного типа (рис.12) готовят раствор заданной концентрации  $C_{a,зд}$  путем перемешивания двух потоков жидкости. Объемные расходы и концентрации исходных компонентов соответственно обозначены  $v_1, C_{a,1}, v_2, C_{a,2}$  ( $v_1 = 1; v_2 = 1; V = 10$ ). Отклонение концентрации готовой смеси  $C_a$  от заданного значения возникает из-за возмущения по нагрузке  $v_1$  и регулируется изменением потока  $v_2$ . Концентрации  $C_{a,1}$  и  $C_{a,2}$  постоянны ( $C_{a,1} = 1; C_{a,2} = 1$ ). Таким образом, рассматривается одноконтурная система регулирования по отклонению (рис.1). Получить дифференциальное уравнение (или передаточную функцию) объекта регулирования. Составить структурную схему модели системы регулирования для П-, И-, ПИ- и ПИД-регуляторов. Получить кривые переходного процесса. Моделирование провести в пакете Simulink.

Составим математическое описание звеньев системы регулирования. Дифференциальное уравнение материального баланса смесителя имеет вид:

$$V \frac{dC_a}{dt} = v_1 C_{a,1} + v_2 C_{a,2} - v C_a,$$

где  $v = v_1 + v_2$ .

Разделим все члены уравнения на  $v$  и запишем его в виде:

$$T \frac{dC_a(t)}{dt} + C_a(t) = k_1 v_1 + k_2 v_2,$$

где  $k_1 = \frac{C_{a,1}}{v}; k_2 = \frac{C_{a,2}}{v}$  – коэффициенты усиления смесителя;  $T = \frac{V}{v}$  – постоянная времени смесителя.

Таким образом, смеситель представляет собой аperiodическое одноемкостное звено. Так как отбор из емкости  $V$  должен быть постоянной, то любое изменение объемного расхода  $v_1$  вызывает ответное равное приращение потока  $v_2$ , т.е.  $v_1 = -v_2$ . Моделирование проведем с помощью пакета Simulink с применением ПИД-регулятора (датчик и исполнительный механизм включаем в уравнение идеального регулятора непрерывного действия). Таким образом, уравнение

$$\frac{dC_a(t)}{dt} = \frac{k_1 v_1}{T} + \frac{k_2 v_2}{T} - \frac{1}{T} C_a$$

и ПИД-регулятор описывает систему регулирования (рис.13).

Функция возмущающего воздействия представляется в виде ступенчатого изменения объемного расхода  $v_1$ . Исходные данные: объем смесителя  $V$ ; объемные расходы  $v_{1,0}$  и  $v_{2,0}$ ; характер и параметры возмущающего воздействия  $v_1(t)$ ; настройки регуляторов  $k_p, k_i, k_d$ ; задающее воздействие на регулятор  $C_{a,30}$ ; начальная концентрация  $C_a(0)$  в смесителе (до нанесения возмущения).

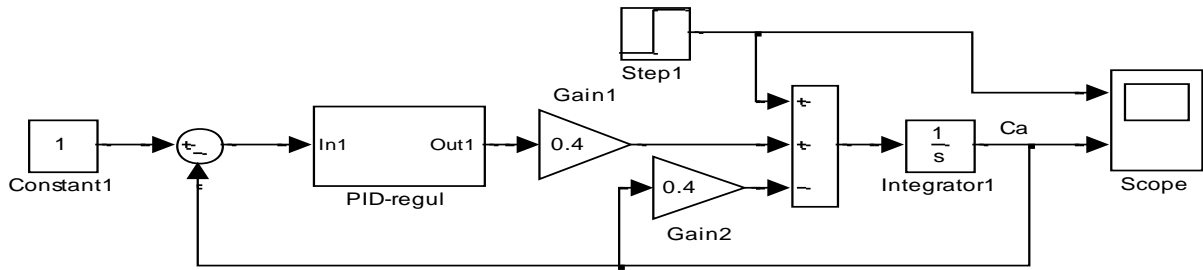


Рис. 13 Модель САР смесителя

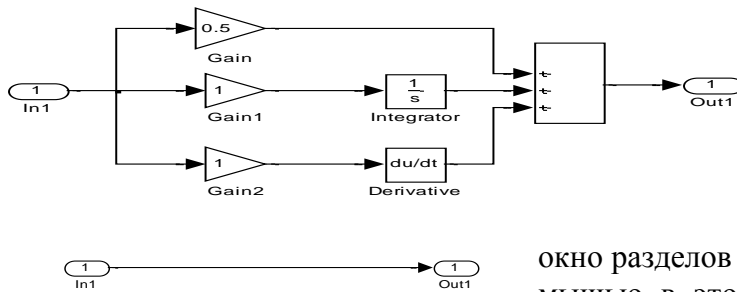


Рис.14 Построенная подсистема

PID-regul создан как подсистема с помощью блока SubSystem (блок-схема в Simulink может иметь «матрешечную» структуру). Открыв

окно разделов библиотеки Simulink, необходимо перетащить мышью в это окно блок **SubSystem** из раздела **Ports & Subsystems**. Затем навести курсор мыши на этот блок и

дважды щелкнуть мышью. Откроется окно подсистемы. Это окно почти пустое – в нем есть лишь блоки **In1** и **Out1**, соединенные стрелкой.

Переместив это окно в удобное положение, выделим мышью порт **In1** и соединение, уничтожим их командой **Clear** в позиции меню **Edit** окна подсистемы. Открыв рядом окно разделов библиотеки Simulink, можно начать строить подсистему (рис.14). Если подсистема содержит ошибки, то их можно впоследствии исправить. На рис.15 представлены графики ступенчатого возмущения (верхний) и переходного процесса регулирования (нижний), построенные с помощью осциллографа Scope.

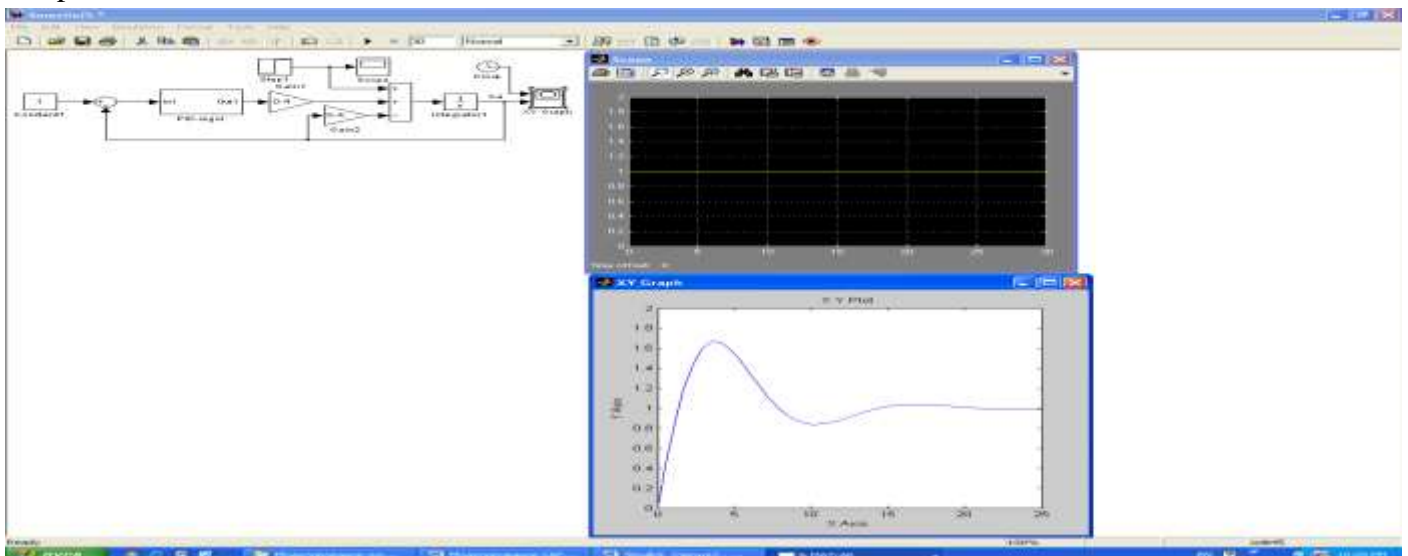


Рис.15 График переходного процесса регулирования при ступенчатом возмущении

На рис.16 представлена система регулирования с ПИД-регулятором, где объектом регулирования выступает звено с передаточной функцией:

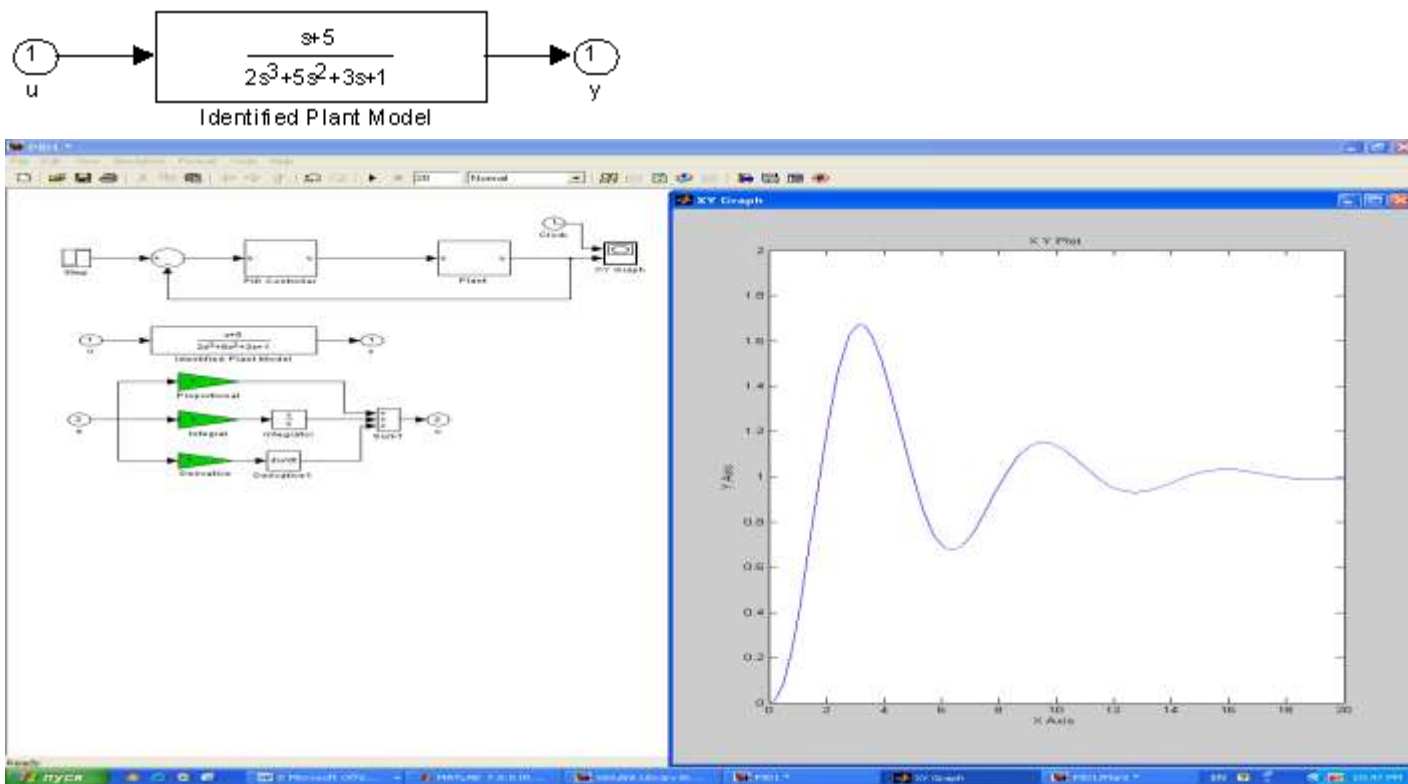
**Упражнения для самостоятельного решения.**

**Упражнение 1.** В одноконтурную систему регулирования смесителя (см. пример выше) включен П-регулятор. Допустимая величина остаточного отклонения  $\delta = 0,05C_{a,ycm}$ . Найти коэффициент настройки  $k_p$ , удовлетворяющий требуемому качеству для ступенчатого внешнего воздействия. Построить графики зависимости остаточного отклонения в зависимости от коэффициента  $k_p$ .

**Упражнение 2.** В контур регулирования смесителя включен И – регулятор.

А). Требуется выбрать настройку регулятора  $k_i$  таким образом, чтобы динамическое отклонение не превышало заданного значения:  $C_{a,дин} \leq 0,4C_{a,ycm}$ . Построить зависимость максимального динамического отклонения от значений настройки  $k_i$  для ступенчатого возмущения.

Б). Выбор настройки И – регулятора определяется временем регулирования, которое задается.



**Рис.16** Модель объекта оптимизации с ПИД-контроллером и график переходного процесса

**Упражнение 3.** Регулирование смесителя осуществляется ПИ-регулятором. Требуется найти такие настройки регулятора  $k_p, k_i$ , чтобы интегральная оценка качества была наименьшая, т.е.  $\min \Delta = \int C_a^2(t)dt$ . Схема оценки качества подключается к выходу интегрирующего блока.

**Упражнение 4.** Составить модель и исследовать переходный процесс с интегральной оценкой качества для одноконтурной системы регулирования (см.упражнение 3) с учетом динамических свойств чувствительного элемента (датчика) и исполнительного механизма. Объектом регулирования является смеситель, описанный выше. Передаточные функции датчика концентрации и исполнительного механизма имеют вид:



$$W_{\delta}(p) = \frac{k_{\delta}}{T_{\delta}p + 1}; \quad W_{им}(p) = \frac{k_{м}}{T_{м}p + 1}$$

Структурная схема САР смесителя с датчиком и исполнительным механизмом приведена на рис.17.

**Упражнение 5.** Для полученной S-модели в упражнении 5 провести исследование одноконтурной системы регулирования в двух направлениях:

- 1) как влияют на качество регулирования динамические свойства датчика и исполнительного механизма;
- 2) для датчика и исполнительного механизма установить наилучший закон регулирования, т.е. выбрать тип регулятора и параметры настройки по интегральному критерию качества.

**Упражнение 6.** В одноконтурную систему автоматического регулирования смесителя включить нелинейность типа «зона нечувствительности» (блок dead zone) регулятора, как показано на рис.18. Величину зоны нечувствительности изменять в пределах 5-10% от  $y^{(\infty)}$  по кривой разгона объекта. Снять переходные процессы с объекта регулирования для двух-трех значений зоны нечувствительности при неизменной настройке регулятора и постоянной величине внешнего воздействия. Сопоставить графики переходных процессов, а также получить интегральные оценки качества регулирования.

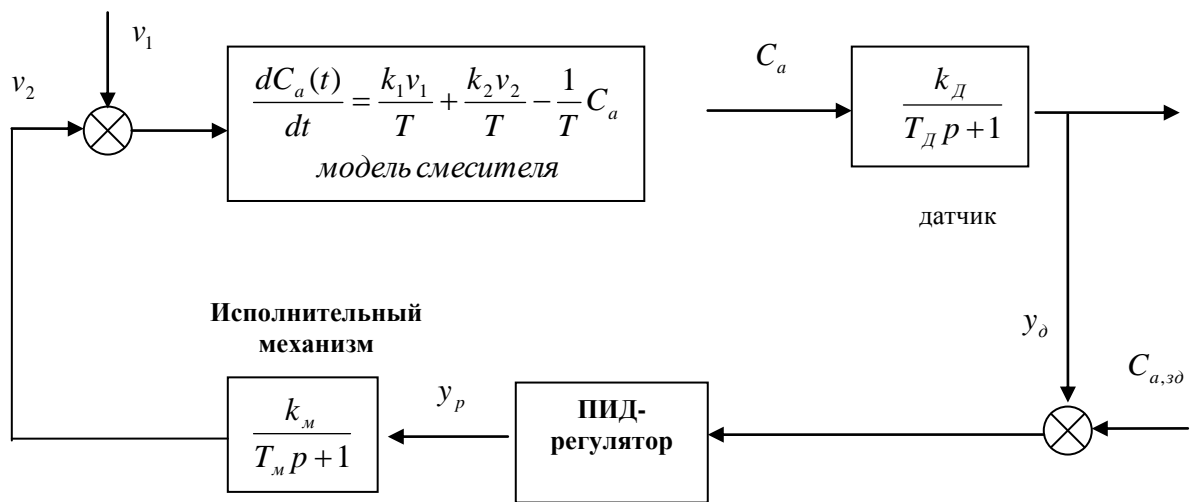


Рис.17 Структурная схема САР смесителя с датчиком и исполнительным механизмом

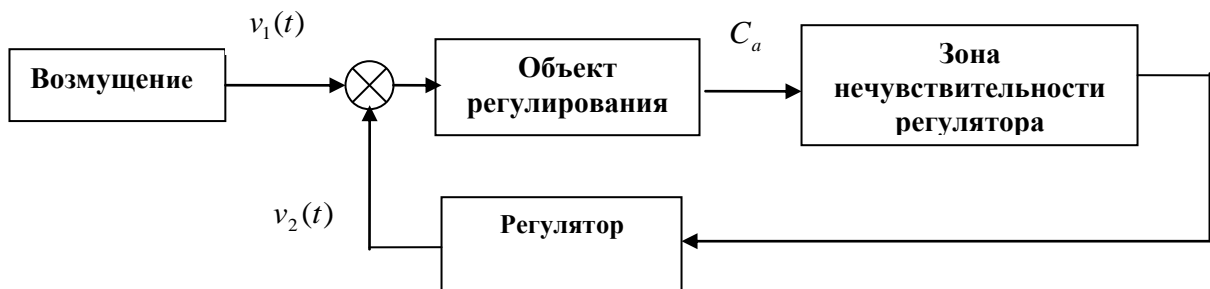


Рис.18 Схема включения в одноконтурную САР нелинейности типа «зона нечувствительности»

**Упражнение 7.** В одноконтурную систему автоматического регулирования смесителя включить нелинейность типа «ограничение по модулю» (блок saturation), а затем «гистерезис» (блок relay) исполнительного механизма, как показано на рис.19. Снять кривые регулирования при неизменной настройке регулятора, но при различной величине ступенчатого воздействия. Сопоставить интегральные оценки качества регулирования.



Рис.19 Схема включения в одноконтурную САР нелинейности «ограничение по модулю» или «гистерезис»

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов, В. П., Simulink 5/6/7. Самоучитель. / В. П. Дьяконов. - М.: Изд-во ДМК, 2008. - 784 с.
2. Терёхин, В.В. Основы моделирования в MATLAB. Часть 2. Simulink. Учебное пособие. / В.В. Терёхин. - Новокузнецк, 2004. - 304 с.
3. Дьяконов, В.П. Математические пакеты расширения MATLAB. Спец. справочник. / В.П. Дьяконов, В.В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. - 480 с.
4. Потёмкин, В.Г. Инструментальные средства MATLAB 5.x. / В.Г. Потёмкин. – М.: Диалог-МИФИ, 2000. - 336 с.
5. Дьяконов, В. П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. / В. П. Дьяконов. – М.: Солон-Р, 2005. - 576 с.
6. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: учебное пособие. / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт., 2001. - 209 с.

Методическое издание

**БОГАТИКОВ Валерий Николаевич**  
**ДРАНИШНИКОВ Леонид Васильевич**  
**ПРОРОКОВ Анатолий Евгеньевич**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Подписано в печать 29.11.11. Формат 60\*841\_1/\_16  
Бумага типографская. Офсетная печать. 1,2 уч.-изд.л.  
Тираж 100 экз. Изд. № 25 КФ

Издательство Петрозаводского государственного университета  
Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Отпечатано подразделением оперативной полиграфии  
Кольского филиала Петр ГУ  
Апатиты, ул. Космонавтов, 3