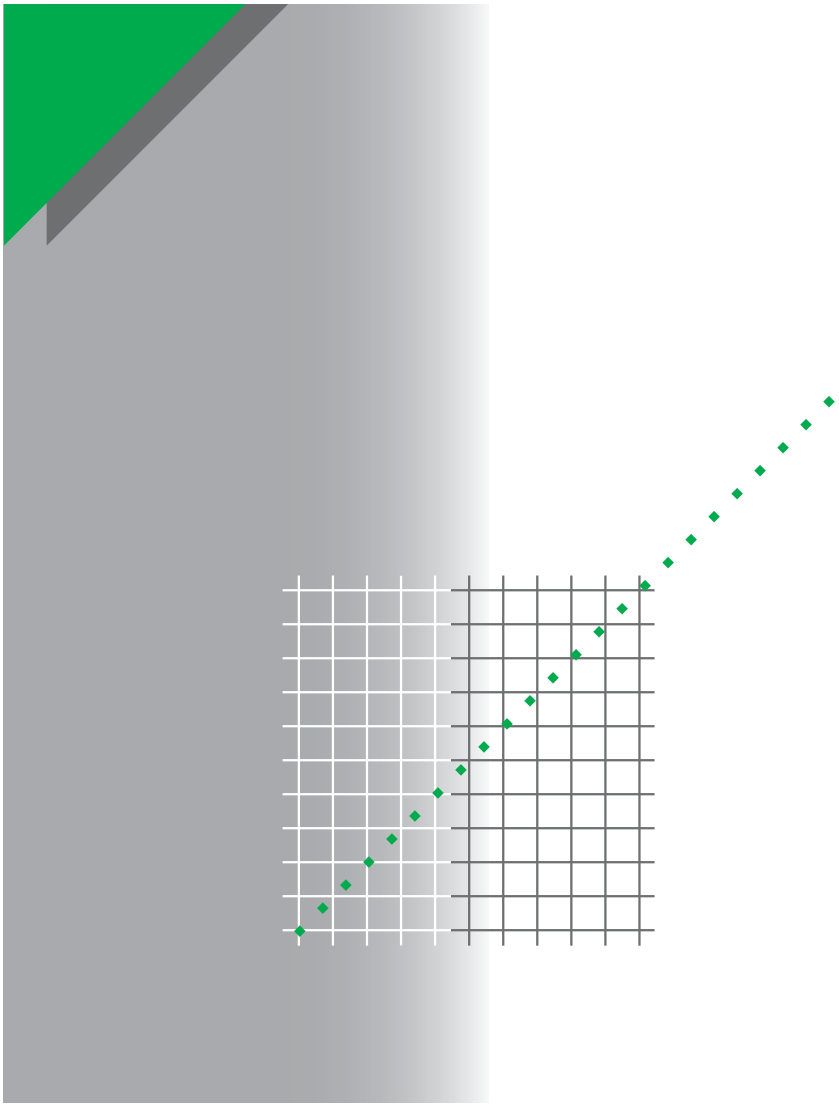
Техническая коллекция Schneider Electric

Выпуск № 16

Системы автоматического управления на основе программируемых логических контроллеров



Schneider Electric

Компания Schneider Electric приступила к выпуску ***«Технической коллекции Schneider Electric»*** *на русском языке.*

Техническая коллекция *представляет собой серию отдельных выпусков для специалистов, которые хотели бы получить более подробную техническую информацию о продукции Schneider Electric и ее применении, в дополнение к тому, что содержится в каталогах.*

В ***Технической коллекции*** *будут публиковаться материалы, которые позволят лучше понять технические и экономические проблемы и явления, возникающие при использовании электрооборудования и средств автоматизации Schneider Electric.*

Техническая коллекция *предназначена для инженеров и специалистов, работающих в электротехнической промышленности и в проектных организациях, занимающихся разработкой, монтажом и эксплуатацией электроустановок, распределительных электрических сетей, средств и систем автоматизации.*

Техническая коллекция *будет также полезна студентам и преподавателям ВУЗов. В ней они найдут сведения о новых технологиях и современных тенденциях в мире Электричества и Автоматики.*

В каждом выпуске ***Технической коллекции*** *будет углубленно рассматриваться конкретная тема из области электрических сетей, релейной защиты и управления, промышленного контроля и автоматизации технологических процессов.*

Валерий Саженков,
Технический директор
ЗАО «Шнейдер Электрик»,
Кандидат технических наук

Выпуск № 16

Системы автоматического управления на основе программируемых логических контроллеров

Выпуск № 16, март 2008 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

Глава 1. Проблемы формирования законов управления 4

1.1. Классификации САР 7
1.2. Коррекция динамических систем и законы регулирования 9
1.3. Включение функциональных преобразователей в прямую цепь 10
1.4. Включение функциональных преобразователей параллельно некоторым звеньям контура регулирования – местные обратные связи (ОС) 12
1.5. Включение функциональных блоков, осуществляющих преобразование внешнего воздействия 13
1.6. Пропорциональные регуляторы 14
1.7. Пропорционально-интегральные регуляторы 17
1.8. Пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы . .20
1.9. Автоматизация настройки ПИ- и ПИД- регуляторов 21

Глава 2. Библиотека алгоритмов регулирования в пакете Unity Pro 25

2.1. Управление вводом/выводом аналоговых сигналов (IO Management) 25
2.2. Библиотека CONT_CTL. Непрерывные системы управления 30
2.2.1. Устройства обработки данных (Conditioning) 31
2.2.2. Регуляторы (Controller) 32
2.2.3. Арифметические операции (Mathematics) 34
2.2.4. Измерение (Measurement) 35
2.2.5. Устройства сопряжения с объектом (Output processing) 36
2.2.6. Формирование сигналов задания (Setpoint management) 37
2.3. Системы с обратной связью (CLC_INT) 39
2.4. Управление с обратной связью (CLC) 40
2.5. Управление с обратной связью – CLC_PRO (для профессионалов) 41

Глава 3. Автоматизированная настройка ПИД-РЕГУЛЯТОРА в ПАКЕТЕ UNITY PRO 50

3.1. Моделирование объекта управления и возмущений 50
3.1.1. Функциональный блок LAG (апериодическое звено) 50
3.1.2. Функциональный блок DEADTIME (запаздывание) 52
3.1.3. Функциональный блок FGEN (генератор функций) 54
3.2. Программирование, отладка и управление ПИД-регулятором 57
3.2.1. Регулятор PI_B 57
3.2.2. Регулятор PIDFF 61
3.3. Адаптация и автоматическая настройка ПИД-регулятора 69

Заключение 75
Список литературы 76

Деменков Николай Петрович,
доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.,
руководитель Центра компетенции Schneider Electric

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ

Введение

Автоматические регуляторы или программируемые логические контроллеры (ПЛК) – регулирующие и логические – являются широко распространенными средствами автоматизации в составе локальных и распределенных систем контроля и регулирования [1, 2, 3].

Внедрение ПЛК в процессы управления дает возможность контролировать изменение параметров без прерывания технологического процесса и использовать текущие значения параметров (либо их оценки) для формирования управляющих воздействий. Если параметры изменяются во времени достаточно медленно, то такие методы управления могут оказаться весьма эффективными, поскольку не связаны с прерыванием технологического процесса для тестирования управляемого процесса.

Описание вопросов (методики, алгоритмов и программного обеспечения), связанных с организацией процедур управления в замкнутой системе управления технологическими процессами, дано в последующих главах.

В первой главе рассмотрены вопросы, связанные с формированием законов регулирования при использовании промышленных ПЛК, даны некоторые сведения из теории и практики автоматического регулирования, в частности, вопросы коррекции динамических систем.

Одним из лучших в мире является контроллер Quantum компании Schneider Electric. Пакет Unity Pro для программирования контроллеров Quantum, Premium и Atrium на всех пяти языках международного стандарта МЭК 61131–3 имеет обширную библиотеку алгоритмов для организации процессов регулирования, включая и автоматическую настройку регуляторов.

Во второй главе кратко рассмотрены штатные функциональные блоки пакета Unity Pro, в которых реализованы различные алгоритмы, используемые для решения задач непрерывного управления.

Третья глава посвящена автоматизированной настройке систем регулирования в Unity Pro. Рассмотрены решения следующих проблем: моделирование объекта управления и возмущений; программирование, отладка и управление ПИД-регулятором; адаптация и автоматическая настройка ПИД-регулятора.

ГЛАВА 1.
ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ

Термином ПЛК обозначают устройства, осуществляющие преобразование, обработку, хранение информации и выработку команд управления или управляющих/регулирующих воздействий, реализованные на базе микропроцессорной техники и являющиеся по сути специализированными управляющими вычислительными комплексами для работы в локальных и распределенных системах управления в реальном масштабе времени (рис.1.1).

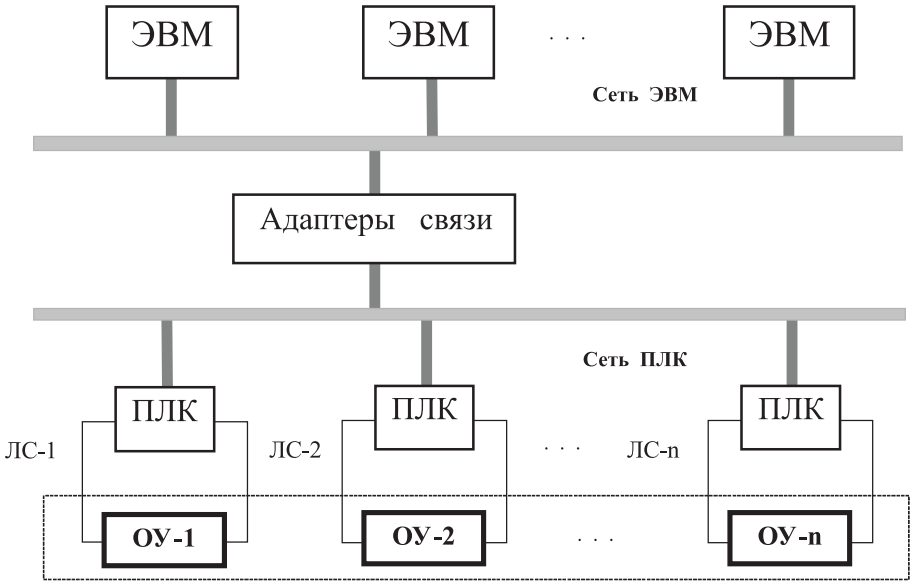


Рис.1.1. Общая функциональная схема распределенной (сетевой архитектуры) иерархической системы управления:
ПЛК - программируемый логический контроллер;
ОУ-n - объект управления (автономный или часть распределенного объекта);
ЛС-n - локальная система управления

Основная функция ПЛК – это формирование сигнала рассогласования между регулируемой величиной и ее заданным значением, а также динамическое преобразование сигнала рассогласования по типовым алгоритмам (законам) регулирования.

Одними из основных эксплуатационных требований, которым должны удовлетворять ПЛК, являются:

1. Безударность:

- при переходе с одного из режимов управления на другой (например, с режима ручного управления на автоматический и обратно) она обеспечивается, в частности, наличием интегрирующего устройства, состоящего из двух интеграторов: например, второй интегратор, используемый при ручном управлении, отслеживает выход узла (интегратора), обеспечивающего динамическое преобразование; при переключении

в режим ручного управления выходной сигнал интегрирующего устройства формируется вторым интегратором, а первый интегратор отключается от входа и переводится одновременно в режим слежения за выходным сигналом;

- при переходе с одного из источников задания на другой в режиме автоматического управления также должен осуществляться безударно, например, с внешнего источника задания на внутренний (ручное задание, на программное изменение задания);

2. Ограничение выходного сигнала ПЛК по верхнему и нижнему уровням и сигнализация о предельных значениях этих уровней; при достижении соответствующего уровня ограничения интегрирующее устройство отключается от источника входного сигнала, благодаря этому регулятор работает всегда в зоне линейности.

Выполнение требований 1 и 2 осуществляется посредством управления операциями интегрирования, входящими в соответствующие алгоритмы (функциональные блоки): а) при переключениях с одного из режимов на другой управление сводится к отключению интегратора и формированию для него других начальных условий, соответствующих новому режиму (иногда эти процедуры называют «обратным счетом»), именно это обеспечивает безударность; б) при выходе значений сигнала за предельные (например, yMIN или yMAX), управление сводится к запрету операции интегрирования и ее запуску после возвращения значений сигнала в рабочий диапазон.

3. Гальваническое разделение входных и выходных цепей (эта задача решается на уровне соответствующих устройств сопряжения с объектом (УСО));

4. Связь с управляющими комплексами верхних уровней иерархии;

5. Автоподстройка и настройка (адаптивность) динамических параметров регулятора (адаптивные регуляторы).

Всякий процесс регулирования (управления) предполагает наличие двух подсистем (рис.1.2): управляемой системы, т.е. одного или нескольких **объектов управления** и управляющей или регулирующей системы (регулятора), которые в совокупности образуют систему автоматического регулирования (САР).

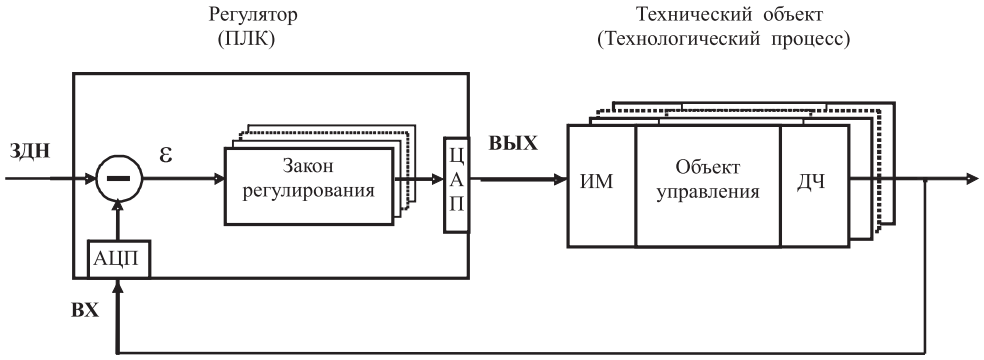


Рис.1.2. Обобщенная схема многоконтурной системы автоматического регулирования (САР):
ЗДН - задающее воздействие; ВХ - вход регулятора (регулируемая величина, выход системы); ВЫХ - выход регулятора (регулирующее воздействие); ε- рассогласование (ошибка); ИМ - исполнительные механизмы; ДЧ - датчики; АЦП - аналого-цифровые преобразователи; ЦАП - цифроаналоговые преобразователи.

Объект управления (ОУ). Любой технический объект (ТО) или технологический процесс (ТП): станок, печь для термообработки, двигатель, технологический агрегат и т.д., для обеспечения нормального функционирования которого строится система автоматического (или автоматизированного) управления, носит название объекта управления или управляемого объекта. Другими словами, объект управления - это основной элемент САР, требуемый режим которого должен поддерживаться регуля-

торами (одним или несколькими). Объект управления выполняет определенные технические операции над материальными и/или информационными компонентами.

Исполнительный механизм (ИМ) - это устройство, с помощью которого в САР непосредственно осуществляется изменение режима объекта управления; обычно это часть объекта управления - вентили паросиловых установок, обмотки возбуждения электрических машин, рули самолета и т.д.

Всякий объект управления, обладающий массой (в электротехнике и электронике - это наличие емкостей и индуктивностей), является динамическим, поскольку под действием внешних сил и моментов (конечной величины) со стороны объекта управления возникает соответствующая реакция и его положение (или состояние) не может быть изменено мгновенно.

Основная функция ПЛК (регулятора) - вырабатывать управляющие (регулирующие) воздействия, которые обеспечивают выполнение объектом требуемых функций.

Для построения САР необходимо знать математическое описание (математическую модель) объекта управления, т.е. зависимость, связывающую между собой его параметры.

На рис.1.3 приведена структурная схема одноконтурной САР, используемая при расчетах.

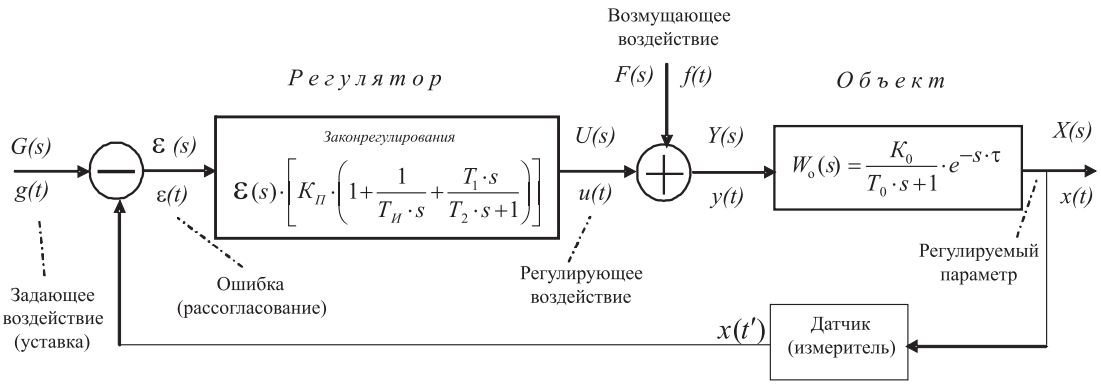


Рис.1.3. Структурная схема

Физическую величину x(t), подлежащую регулированию, называют ***регулируемой*** или ***выходной*** величиной.

Воздействие g(t), которое характеризует требуемое (желаемое) значение регулируемой величины, называют ***задающим воздействием*** (в некоторых задачах его называют уставкой).

Разность ε(t) между заданным g(t) и фактическим x(t) значением регулируемой величины называют ***ошибкой*** или ***рассогласованием***.

Воздействие u(t), вырабатываемое регулятором для осуществления требуемого закона изменения регулируемой величины, называют ***регулирующим воздействием***.

Воздействие f(t), стремящееся нарушить требуемую функциональную связь между задающим воздействием и регулируемой величиной, называют ***возмущающим воздействием***.

Таким образом, можно сказать, что в процессе автоматического регулирования осуществляется преобразование задающего воздействия в регулируемую величину.

В общем случае как задающее воздействие, так и регулируемая величина могут состоять из совокупности различных физических сигналов, т.е. иметь векторный характер. В этом случае система является многомерной и должна описываться в терминах пространства состояний.

Обратная связь, замыкающая систему, передает результат измерения выходной величины на вход системы.

Задача системы состоит в том, чтобы возможно точнее воспроизводить на выходе x(t) задаваемый (на входе) закон изменения g(t) и возможно полнее подавлять влияние возмущающего воздействия f(t), а также других внешних и внутренних помех, если они имеются. Выходная величина x(t) сравнивается с входной величиной $x'(t) = k \cdot x(t)$ g(t). Для этих целей используется соответствующий датчик (измеритель) .
На выходе сравнивающего устройства формируется рассогласование (ошибка)

$$\varepsilon(t) = g(t) - x'(t) = g(t) - k \cdot x(t)$$

Рассогласование ε служит источником воздействия на систему, причем система работает на уничтожение или сведение к допустимому малому значению величины этого рассогласования.

1.1. КЛАССИФИКАЦИИ САР

По виду задающего воздействия.

В общем случае задающее воздействие может изменяться произвольно. По виду задающего воздействия САР классифицируют следующим образом:

1) при **g(t) = const** САР называют собственно системами автоматического регулирования - они работают на поддержание постоянного значения регулируемой величины (например, уровня жидкости в баке/котле, скорости вращения вала двигателя, температуры в некотором замкнутом объеме и т.п.). Это типичные системы регулирования по заданной настройке/уставке регулятора.

Такие системы называют также системами стабилизации (например, стабилизации напряжения на клеммах генератора, крена самолета и т.п.).

2) при **g(t), заранее заданной во времени**, т.е. когда задана программа (закон) изменения этого воздействия, говорят о программном автоматическом регулировании и о системах программного регулирования.

При этом выходная/регулируемая величина должна следовать заданной программе/закону изменения во времени.

3) при **g(t), изменяющейся случайным/произвольным образом**, САР называют следящей системой.

Законы регулирования, реализуемые ПЛК, могут быть получены на основе известных в теории автоматического регулирования методов коррекции, когда желаемые динамические характеристики системы достигаются с помощью последовательных и параллельных корректирующих устройств и обратных связей. В современных ПЛК это реализуется программно. В некоторых задачах исполнительные механизмы также участвуют в формировании закона регулирования (например, в импульсных регуляторах).

По виду регулируемого параметра автоматические регуляторы подразделяются на регуляторы температуры, давления, влажности, разряжения, расхода, состава и т. п.

По характеру изменения регулирующего воздействия автоматические регуляторы подразделяются на регуляторы с линейными и нелинейными законами регулирования.

Примером регуляторов с нелинейным законом регулирования могут служить двухпозиционные регуляторы температуры в холодильных машинах. В трехпозиционных дискретных системах выходной сигнал может принимать три значения: –1, 0, +1, т.е. “меньше”, “норма”, больше”. Качество работы таких САР выше, хотя их надежность ниже.

Регуляторы с линейным законом регулирования по математической зависимости между входными и выходными сигналами подразделяются на следующие основные виды:

— пропорциональные (П-регуляторы);

— пропорционально-интегральные (ПИ-регуляторы);

— пропорционально-дифференциальные (ПД-регуляторы);

— пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-регуляторы).

Для подавления помех и пульсаций сумма П- и Д-составляющих часто демпфируется фильтром с регулируемой постоянной времени.

При импульсном регулировании формирование ПИ-закона регулирования осуществляется совместно с интегрирующим исполнительным механизмом постоянной скорости.

В зависимости от вида используемой энергии регуляторы подразделяются на электрические (электромеханические, электронные), пневматические, гидравлические и комбинированные.

Наиболее часто используемыми в различных отраслях промышленности являются электрические регуляторы. Пневматические и гидравлические регуляторы, как правило, применяются во взрыво- и пожароопасных зонах.

В зависимости от задающего воздействия и параметров объекта регулирования подбирают регулятор с определенной характеристикой W_P . Изменение W_P адекватно ведет к изменению коэффициентов дифференциального уравнения общего передаточного звена (регулятор-объект) и тем самым достигается необходимое качество регулирования. В промышленных регуляторах эти величины называются параметрами настройки. Параметрами настройки являются: коэффициент усиления, зона нечувствительности, постоянная времени интегрирования, постоянная времени дифференцирования и т. д. Для изменения параметров настройки в регуляторах имеются органы настройки (управления).

Кроме органов настройки основных параметров, регуляторы имеют также органы настройки, косвенно влияющие на эти коэффициенты или режимы его работы, например, органы настройки, изменяющие чувствительность регулятора, демпфирование входного сигнала и др.

Исходя из характера протекания процесса управления требования к системе формируются по следующим показателям:

1.2. КОРРЕКЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

— точность;

— устойчивость;

— качество переходного процесса.

Точность системы задается и определяется в установившихся режимах. *Устойчивость* гарантирует затухание переходного процесса, после чего обеспечивается желаемое *качество* затухающего переходного процесса.

В тех случаях, когда САР оказывается неустойчивой или когда качество ее работы не удовлетворяет поставленным требованиям, улучшение ее динамических свойств и повышение устойчивости в ряде случаев может быть достигнуто путем введения в систему последовательно со звеньями прямой цепи дополнительных функциональных блоков или же местных (локальных) обратных связей (ОС), которые обеспечивали бы получение управляющего сигнала в виде суммы сигнала рассогласования с дополнительными сигналами, характеризующими его производную, интеграл или иную функцию. Такие функциональные блоки называют *корректирующими устройствами*. Следует отметить, что наряду с формированием управляющего сигнала по ошибке может использоваться и внешнее воздействие (тоже с использованием соответствующих интегралов и производных).

Можно указать следующие общие пути обеспечения заданного качества работы САР в переходном и установившемся режимах:

— *введение в прямую цепь* усилителя с таким **коэффициентом усиления**, который рационально влиял бы на качество как в переходном, так и в установившемся режимах;

— *введение в прямую цепь* **интеграторов** для обеспечения заданной точности работы САР в установившемся режиме:

— *введение в прямую и обратную цепи* системы **дифференцирующих звеньев** для обеспечения заданного качества работы в переходном режиме.

При использовании ПЛК чаще всего предполагается, что для коррекции применяются только те преобразования, которые заложены в типовые регуляторы («библиотечные» алгоритмы, функциональные блоки).

Если библиотечные алгоритмы не позволяют осуществить те или иные законы регулирования (виды коррекции), то нужно использовать дополнительные преобразования. Речь идет о введении дополнительных функциональных преобразователей и включении их либо последовательно с основными звеньями контура регулирования, либо параллельно некоторым из них, либо комбинировании этих способов. Приведенные ниже сведения из теории автоматического регулирования позволяют использовать для коррекции системы преобразования, не входящие в состав стандартных регуляторов.

Изменение общего коэффициента передачи/усиления ($K_п$) разомкнутой системы .

Увеличение $K_п$ – это способ повышения точности системы, при этом уменьшаются

1.3. ВКЛЮЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПРЯМУЮ ЦЕПЬ

все виды установившихся ошибок системы.

Однако нужно помнить, что увеличение Кп ведет к ухудшению условия устойчивости, а значит, и качества переходного процесса. При некотором $K_п > K_{кр}$ (критическое значение) система становится неустойчивой.

Поэтому увеличение $K_п$ целесообразно делать одновременно с введением производной (рис.1.4).

Введение производной от ошибки (как в чистом виде, так и с инерционностью) представляет собой простейший способ улучшения качества переходного процесса .

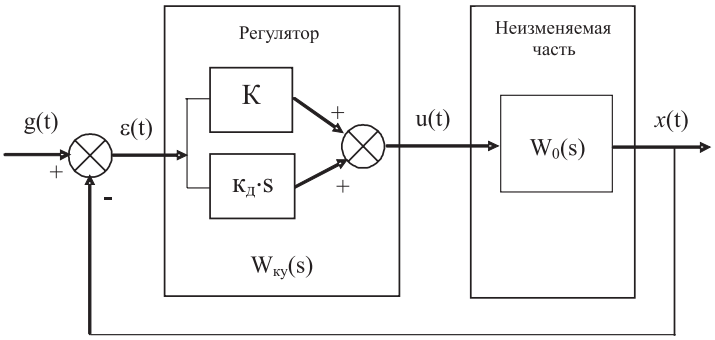


Рис.1.4. Введение производной от ошибки

Из-за наличия дифференцирующего звена (см. рис.1,4) регулятор формирует сигнал управления u(t) с прогнозом: если амплитуда ε(t) увеличивается, производная ε′(t) положительна и значение сигнала u(t) увеличивается. С момента уменьшения сигнала ε(t) сигнал ε′(t) и сигнал u(t) интенсивно уменьшается (рис.1.5).

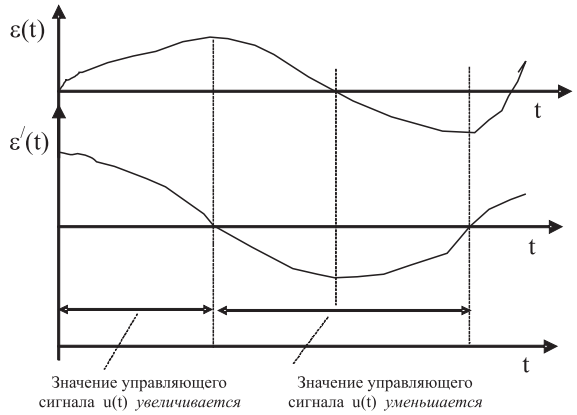


Рис.1.5. Диаграмма изменения во времени ε(t) и ε′(t)

Чаще всего производная вводится не в чистом виде, а с инерционностью, например, в виде звена с передаточной функции $W(s)=\frac{T \cdot s}{T_1 \cdot s+1}$, где s – символ комплексной переменной преобразования Лапласа.

При введении воздействия по производной осуществляется положительный сдвиг по фазе, увеличивая тем самым запас устойчивости и улучшая качество переходного процесса.

Для подавления помех и пульсаций сумма П- и Д-составляющих может быть задемпфирована фильтром с регулируемой постоянной времени $T_ф$.

В случае неидеального дифференцирования (с инерционностью) этот эффект несколько уменьшается количественно, но качественно сохраняется.

Пусть имеется астатическая система с интегрирующим и апериодическим звеньями, причем требуется уменьшить динамические ошибки этой системы и повысить ее быстродействие. Если просто увеличить усиление системы, то это может привести к уменьшению запаса устойчивости или полной потере устойчивости системы.

Иной результат будет достигнут при дополнительном воздействии по производной сигнала рассогласования, осуществимом посредством последовательного включения в контур регулирования дифференцирующего звена.

Построив амплитудно-фазовые характеристики исходной системы и той же астатической системы с последовательно включенным дифференцирующим звеном, можно установить, что добавление производной сигнала рассогласования приводит к повышению запаса устойчивости системы по фазе при одновременном снижении инерционности ее звеньев. Это позволяет значительно увеличить коэффициент усиления, сохранив прежний запас устойчивости, или обратить неустойчивую систему в устойчивую. Кроме того, динамические ошибки системы уменьшатся, а ее быстродействие возрастет.

В статических САР введение дополнительного воздействия по производной сигнала рассогласования также улучшает качество работы системы, т.к. ее инерционность уменьшается.

Введение интеграла от ошибки представляет собой метод повышения порядка астатизма системы, а значит, и увеличения ее точности. Однако при этом осуществляется отставание (отрицательный сдвиг) по фазе на –90°, что ухудшает условия устойчивости и качество переходного процесса.

Если регулирование с воздействием по производной сигнала рассогласования снижает динамические ошибки системы, то введение дополнительного воздействия по интегралу сигнала рассогласования приводит к уменьшению статических ошибок систем. Для осуществления коррекции последовательно со звеньями системы включают интеграторы.

Построив логарифмические АФЧХ исходной системы и той же системы с последовательно включенным интегрирующим звеном, можно убедиться, что регулирование с воздействием по интегралу сигнала рассогласования увеличивает коэффициент усиления системы, особенно на низких частотах при одновременном снижении статических ошибок. Однако при этом уменьшается быстродействие системы и ее запас устойчивости. Для устранения этого недостатка применяют комбинированную коррекцию с воздействием по интегралу и по производной сигнала рассогласования.

Введение изодромной коррекции вида $\frac{T\cdot s+1}{T\cdot s}\left(или\ 1+\frac{1}{T\cdot s}\right)$ - объединяет в себе введение интеграла и производной. Оно позволяет избежать недостатков предыдущей коррекции и получать необходимый порядок астатизма системы, сохраняя устойчивость и качество системы в переходном режиме. Следовательно, если в случае простого введения интеграла регулирование в системе производится не по величине ошибки, а только по интегралу от нее, то при изодромном устройстве мы получаем регулирование по ошибке и по интегралу (аналогично тому, как это было показано при регулировании по ошибке и по ее производной).

1.4. ВКЛЮЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПАРАЛЛЕЛЬНО НЕКОТОРЫМ ЗВЕНЬЯМ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ – МЕСТНЫЕ ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ (ОС)

Основные виды ОС:

- жесткая ОС (действует на систему как в переходном, так и установившемся режимах) $W_{oc}(S)=K_{oc}$;
- инерционная жесткая ОС $W_{oc}(S)=\frac{K_{oc}}{T_{oc}\cdot S+1}$;
- гибкая ОС (действует только в переходных режимах) $W_{oc}(S)=k_{oc}\cdot s$;
- инерционная гибкая ОС $W_{oc}(S)=\left(\frac{k_{oc}\cdot s}{T_{oc}\cdot s+1}\right)$

Местные жесткие ОС (ЖОС) применяют для повышения устойчивости системы . ЖОС действует на систему как в переходном, так и установившемся режимах: цепь ЖОС содержит только безынерционные элементы (обозначим коэффициент ОС как K_{oc}), благодаря которым выходной сигнал этой цепи (звена 4 на рис.1.6) в любом режиме работы системы всегда прямо пропорционален выходному сигналу звена, охваченного этой связью (звено 2).

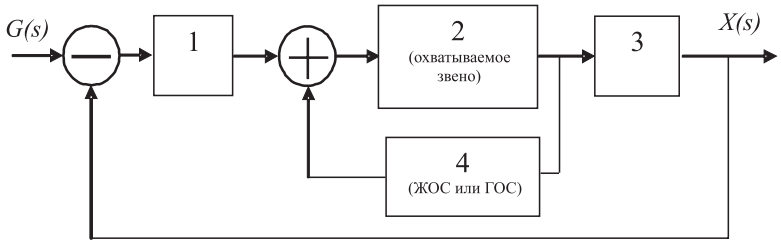


Рис.1.6. Схема САР с внутренней цепью обратной связи

Рассмотрим два случая введения ЖОС:

1) ЖОС охватывает *интегрирующее звено* $W(j\omega)=\frac{k}{j\omega}$. В этом случае частотная характеристика звена, охваченного ЖОС ($W_{охв}(j\omega)$), имеет вид:

$$W_{охв}(j\omega)=\frac{\frac{k}{j\omega}}{1+\frac{k}{j\omega}\cdot K_{oc}}=\frac{1}{K_{oc}}\cdot\frac{1}{1+\frac{k}{j\omega}\cdot K_{oc}\cdot k}$$

Отсюда следует, что интегрирующее звено, охваченное ЖОС, приобретает свойства апериодического звена с постоянной времени $T'=\frac{1}{K_{oc}\cdot k}$ и коэффициентом передачи $k'=\frac{1}{K_{oc}}$.

Данное обстоятельство используется для подавления автоколебаний, возникающих в системах, содержащих два интегратора. Применение ЖОС превращает одно

из них в апериодическое, в результате чего фазовый сдвиг в системе на низких частотах уменьшается и система из структурно неустойчивой становится устойчивой.

2) ЖОС охватывает апериодическое звено $W(j\omega)=\frac{k}{1+j\omega T}$,

$$W_{охв}(j\omega)=\frac{\frac{k}{1+j\omega T}}{1+\frac{k}{1+j\omega T}\cdot K_{ос}}=\frac{k}{1+K_{ос}\cdot k}\cdot\frac{1}{1+j\omega\cdot\frac{T}{1+K_{ос}\cdot k}}$$

Отсюда следует, что ЖОС уменьшает постоянную времени апериодического звена, снижая тем самым инерционность всей системы в целом.

Рассмотренные примеры показывают, что введение внутренних ЖОС сопровождается соответствующим понижением коэффициента передачи системы, что неблагоприятно сказывается на ее статической точности. Это объясняется тем, что ЖОС действуют не только в переходном, но и в установившемся режиме работы системы.

В случае, когда апериодическое звено охватывается положительной ЖОС, осуществляется увеличение Кп; однако, одновременно с этим увеличивается и постоянная времени, т.е. инерционность звена (охватываемого), оно может стать неустойчивым.

В отличие от ЖОС действие гибких ОС (ГОС) проявляется только в переходном режиме работы системы. Выходной сигнал ГОС (звено 4 на рис. 1.6) зависит не от величины выходного сигнала охватываемого звена (2), а от скорости его изменения. Поэтому к моменту достижения системой нового установившегося значения действие цепи ГОС прекращается. Можно показать, что постоянная времени апериодического и затухание колебательного звеньев возрастут, если их охватить ГОС.

Это обстоятельство используют для повышения запаса устойчивости статических систем и для подавления колебаний.

В астатических системах гибкой ОС охватывают участок, содержащий интегрирующее и апериодическое звенья, чем достигается существенное уменьшение инерционности этого участка, а следовательно, и всей системы в целом.

1.5. ВКЛЮЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Если наряду с формированием управляющего сигнала по ошибке вводится еще коррекция по внешнему воздействию, то получается **комбинированное регулирование** – по ошибке и по внешнему воздействию (тоже с использованием соответствующих интегралов и производных).

Обычно рассматривают два типа коррекции: 1) по задающему воздействию; 2) по возмущающему воздействию.

Напомним, что задающие воздействия система должна воспроизводить, а возмущающие – нейтрализовать.

Поэтому во втором случае возникают существенные трудности, заключающиеся в том, что возмущающие воздействия, в отличие от задающих, далеко не всегда можно измерить и подать на вход корректирующего устройства.

1.6. ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Структурная схема САР представлена на рис.1.7.

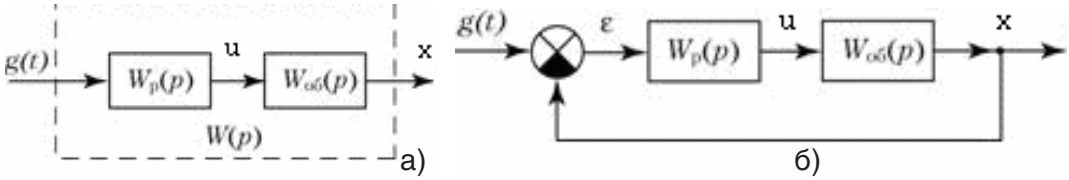


Рис. 1.7. Структурная схема САР: а - разомкнутой системы по каналу задающего воздействия; б - замкнутой системы

Для системы регулирования, показанной на рис.1.7а, амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) определяется выражением $W(j\omega) = W_p(j\omega) \cdot W_{об}(j\omega)$, где $W_p(j\omega)$ – АФЧХ регулятора, $W_{об}(j\omega)$ – АФЧХ объекта регулирования.

Если комплексная частотная характеристика регулятора будет

$W_p(j\omega) = k_P$,

то АФЧХ всей системы запишется в виде

$W(j\omega) = k_P\ W_{об}(j\omega)$.

Следовательно, при подключении к объекту пропорционального регулятора АФЧХ системы на каждой частоте увеличивается в k_P раз.

Пропорциональные регуляторы и имеют один параметр настройки – коэффициент передачи k_P.

Переходные процессы в П-регуляторе описываются выражением

$u = k_P * \varepsilon$.

Здесь ε – входное воздействие на регулятор, равное отклонению регулируемой величины от заданного значения; u – воздействие регулятора на объект, направленное на ликвидацию отклонения регулируемой величины от заданного значения.

На рис.1.8. приведен пример контура регулирования температуры приточного воздуха в канальном кондиционере.

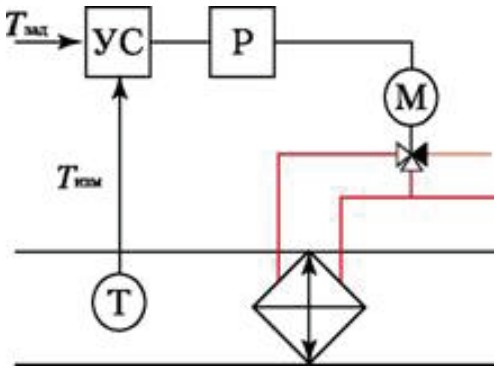


Рис. 1.8. Контур регулирования температуры приточного воздуха в канале центрального кондиционера

Температура воздуха поддерживается водяным калорифером, через который пропускается теплоноситель. Воздух, проходя через калорифер, нагревается. Температура воздуха после водяного калорифера измеряется датчиком (Т), далее эта величина поступает на устройство сравнения (УС) измеренного значения температуры

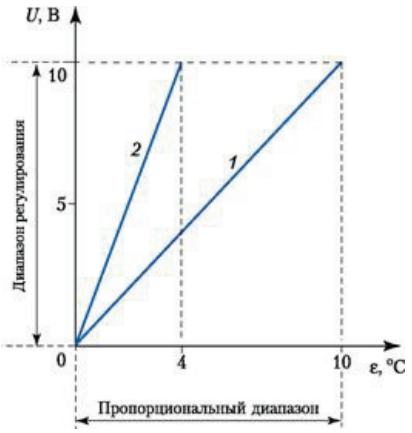
($T_{изм}$) и заданного ($T_{зад}$). В зависимости от разности между температурой уставки и измеренным значением температуры регулятор (Р) вырабатывает сигнал, воздействующий на исполнительный механизм (М – электропривод трехходового клапана). Электропривод открывает или закрывает трехходовой клапан до положения, при котором ошибка

$$\varepsilon = T_{зад} - T_{изм}$$ будет стремиться к нулю.

Выходным сигналом регулятора может быть напряжение в определенном диапазоне (например, постоянное напряжение в диапазоне от 0 до 10 В, ток 0–20мА и т. д).

Диапазон изменения выходного сигнала называется диапазоном регулирования (рис.1.9).

Рис.1.9. График пропорционального регулирования



Диапазон изменения сигнала ошибки называют пропорциональным диапазоном.

В П-регуляторах имеется возможность изменять диапазон регулирования и пропорциональный диапазон.

Из графика на рис.1.9. видно, что чем меньше пропорциональный диапазон, тем круче характеристика регулирования. Кривая (1) соответствует диапазону изменения температуры 0–10 °С, а кривая (2) – диапазону 0–4°С.

Величина $k_P = \frac{\Delta U}{\varepsilon}$ есть коэффициент регулирования. В первом случае $k_P = 1$, а во втором $k_P = 2{,}5$.

При больших значениях k_p в контуре регулирования могут возникнуть колебания (рис.1.10).

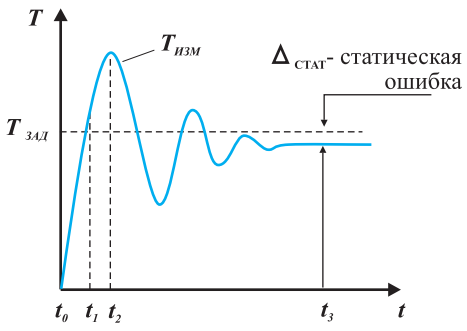


Рис.1.10. Переходный процесс при пропорциональном регулировании

Так, если во время включения системы температура воздуха $T_{изм}$ ниже заданной температуры $T_{зад}$, устройство управления выдает большой сигнал на открытие трехходового клапана. Температура водяного калорифера и приточного воздуха начнет повышаться.

Когда температура приточного воздуха после водяного калорифера достигает $T_{зад}$, устройство управления выдает команду на закрытие трехходового клапана (точка t_1 на рис. 1.10).

Однако из-за того, что калорифер разогрет, температура приточного воздуха до момента t_2 еще будет расти, а затем начнет снижаться. Этот процесс имеет вид затухающих колебаний, и через определенное время (t_3) процесс стабилизируется.

После стабилизации из-за инерционности системы всегда будет существовать статическая ошибка $\Delta_{ст} = T_{зад} - T_{изм}$.

Сигнал на выходе регулятора будет иметь вид

$u(t) = U_0 + k_p \cdot \varepsilon$,

где U_0 – сигнал на выходе устройства управления при $\varepsilon = 0$.

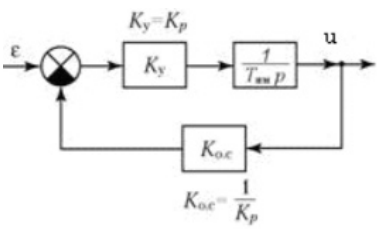
Чем большим выбран пропорциональный диапазон регулирования, тем большей будет величина статической ошибки. При малой величине пропорционального диапазона увеличивается время переходных процессов, и при некоторых условиях может возникнуть автоколебательный (незатухающий) процесс в контуре регулирования.

Путем выбора параметров регулирования П-регулятора можно существенно уменьшить установившуюся ошибку регулирования, однако ее полное устранение не представляется возможным даже теоретически.

Из рис.1.8 видно, что в цепочке регулирования в реальном регуляторе установлено еще одно звено – исполнительный механизм (М). В данном случае – это электродвигатель привода трехходового клапана. Электрический привод является интегрирующим звеном и его влияние по возможности уменьшают, используя обратные связи. Это связано с тем, что динамические свойства участка, охваченного обратной связью, не зависят от динамических свойств прямого участка, а определяются в основном динамическими свойствами звена обратной связи. Эта особенность широко используется на практике при разработке автоматических регуляторов.

Исходя из этого, для устранения влияния исполнительного механизма его необходимо охватить отрицательной обратной связью. Для повышения коэффициента передачи прямого канала отрицательной обратной связью нужно охватить и усилительное звено регулятора. Такие П-регуляторы, называемые позиционерами, можно представить в виде последовательного соединения собственно П-регулятора и некоторого балластного звена с постоянной времени $T_б$.

На рис.1.11 представлена структурная схема П-регулятора, а на рис.1.12 – реализуемый ею закон регулирования.



1.11. Структурная схема П-регулятора

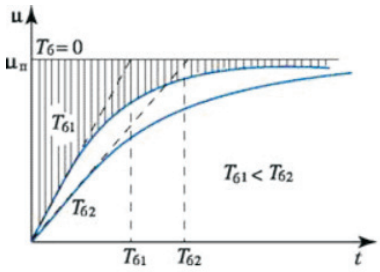


Рис.1.12. Закон П-регулирования

Параметром настройки регулятора является коэффициент передачи устройства обратной связи $k_{ос}$. Коэффициент передачи регулятора $k_п$ тем больше, чем меньше $k_{ос}$. Однако следует иметь в виду, что чем больше $k_п$, тем больше постоянная времени балластного звена и тем больше искажается идеальный закон П-регулирования.

1.7. ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Статическую ошибку, возникающую при пропорциональном регулировании, можно исключить, если кроме пропорционального ввести еще и интегральное звено. Последнее образуется путем постоянного суммирования ε за определенный промежуток времени и формирования сигнала управления, пропорционального полученной величине.

Математически этот процесс может быть описан следующей зависимостью:

$$u = k_u \int_o^t \varepsilon dt \ ,$$

где $k_u=1/T_u$ – коэффициент пропорциональности интегральной составляющей, а T_u - постоянная времени интегрирования, параметр настройки регулятора.

Если $k_u \neq 0$, то даже при незначительных отклонениях регулируемой величины сигнал со временем может достичь любой величины, что приведет к перемещению регулирующего органа до момента, пока ε не станет равным 0.

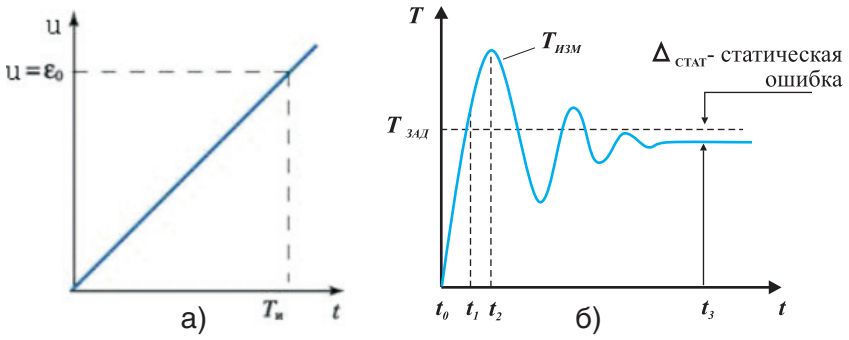
Рассмотрим физический смысл постоянной времени интегрирования. Предположим, что на вход регулятора поступил сигнал $\varepsilon = \varepsilon_0$, а пропорциональная составляющая отсутствует ($k_п = 0$). При этом выходной сигнал будет меняться по закону

$u= \varepsilon_0 \cdot t/T_u$.

По истечении времени $t = T_u$ значение выходного сигнала будет равно $u = \varepsilon_0$ (рис.1.13а).

Таким образом, постоянная времени интегрирования в И-регуляторе равна времени, в течение которого с момента поступления на вход регулятора постоянного сигнала сигнал на выходе регулятора достигнет значения, равного значению входного сигнала.

Переходной процесс в И-регуляторе показан на рис.1.13б. Устраняя статическую ошибку интегральный регулятор, однако, ухудшает качество переходного процесса. Поэтому на практике применяют комбинированные ПИ-регуляторы.



1.13. Закон регулирования (а) и переходной процесс (б) при интегральном (И) регулировании

При этом используется как параллельное соединение пропорционального и интегрального звена (рис.1.14а), так и последовательное соединение (рис.1.14б).

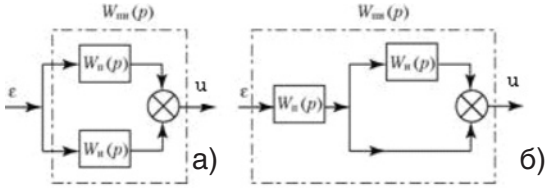


Рис.1.14. Структурная схема идеальных ПИ-регуляторов

ПИ-регулятор оказывает воздействие на регулирующий орган пропорционально отклонению и интегралу от отклонения регулируемой величины

$$u = k_p \varepsilon + \frac{1}{T_u} \int_o^t \varepsilon dt \quad .$$

Для схемы на рис.1.14а частотная характеристика ПИ-регулятора имеет вид

$$W_{ПИ}(j\omega) = k_p + \frac{1}{T_И j\omega} \quad .$$

При скачкообразном изменении регулируемой величины на значение ε_0 ПИ-регулятор со скоростью, определяемой быстродействием привода, перемещает исполнительный механизм на величину ($k_p \cdot \varepsilon_0$), после чего исполнительный механизм дополнительно перемещается в ту же сторону со скоростью $\varepsilon_0/T_и$, пропорциональной отклонению регулируемой величины. Следовательно, в ПИ-регуляторе при отклонении регулируемой величины от заданного значения мгновенно срабатывает пропорциональная (статическая) составляющая регулятора, а затем постепенно увеличивается интегральная (астатическая) составляющая регулятора.

Переходная характеристика ПИ-регулятора для параллельного соединения на рис.1.14а показана на рис.1.15(прямая 1).

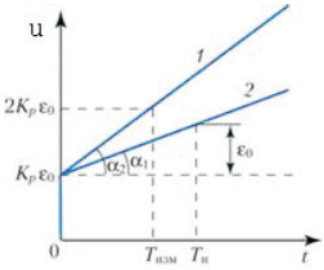


Рис.1.15. Закон ПИ-регулирования регуляторов: 1 - для схемы на рис.1.14а, 2 - для схемы на рис.1.14б

Параметрами настойки являются независящие друг от друга коэффициенты усиления k_p и постоянная времени интегрирования $T_и$.

Схема на рис.1.15б реализует закон регулирования

$$u = k_p \left[\varepsilon + \frac{1}{T_u} \int_o^t \varepsilon dt \right],$$

где Тиз – постоянная времени изодрома.

Частотная характеристика ПИ-регулятора по схеме рис.1.15б имеет вид:

$$W_{ПИ}(j\omega) = k_p \frac{T_{ПИ} j\omega + 1}{T_{ПИ} j\omega}$$

Таким образом, ПИ-регулятор со структурной схемой, приведенной на рис.1.15б, имеет взаимосвязанные параметры настройки статической и астатической частей по коэффициенту k_p. Так, при настройке коэффициента усиления k_p будет изменяться и постоянная времени интегрирования:

$$T_и = \frac{T_{ПИ}}{k_p}.$$

Рассмотрим физический смысл постоянной времени изодрома $T_{из}$. Предположим, что на вход регулятора поступил постоянный сигнал ε_0. Тогда

$u = k_p\,\varepsilon_0(1+t/T)$.

При поступлении на вход регулятора сигнала ε_0 в начальный момент сработает пропорциональная составляющая и на выходе регулятора появится сигнал $u_1=k_p\varepsilon_0$. В дальнейшем линейно начинает нарастать выходной сигнал от интегральной составляющей и при $t= T_{из}$ достигнет значения $u_2=2k_p\varepsilon_0$. $T_{из}$ – это время, в течение которого от начала действия интегральной (астатической) составляющей регулятора пропорциональная (статическая) составляющая удваивается. Переходной процесс при ПИ-регулировании показан на рис.1.16.

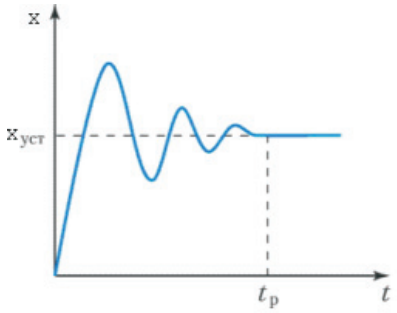


Рис.1.16. Переходной процесс при пропорционально-интегральном регулировании

ПИ-регулятор обеспечивает нулевую ошибку в установившемся состоянии.

Варианты структурных схем промышленных ПИ-регуляторов приведены на рис.1.17.

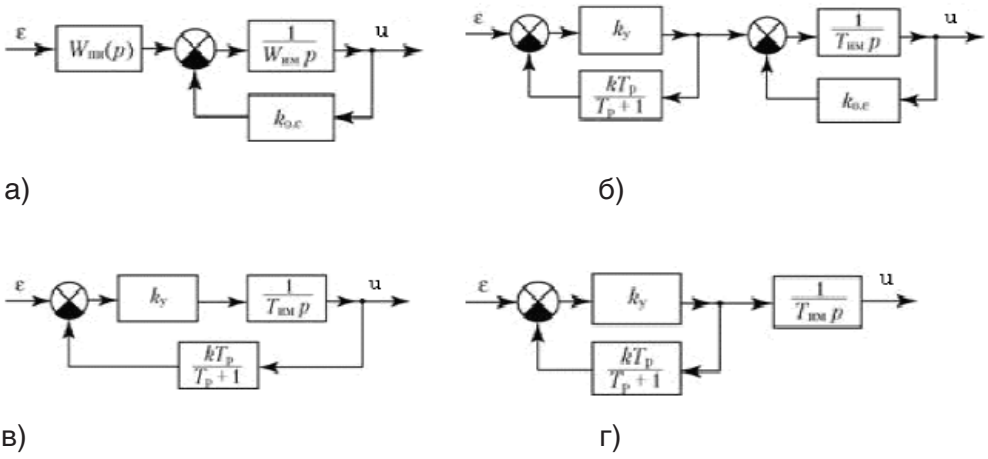


Рис.1.17. Структурные схемы промышленных ПИ-регуляторов

Выбирая ту или иную схему, можно подобрать наиболее подходящую структуру для Вашей задачи.

1.8. ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ (ПИД) РЕГУЛЯТОРЫ

Пропорциональные и пропорционально-интегральные регуляторы не могут упреждать ожидаемое отклонение регулируемой величины, реагируя только на уже имеющееся отклонение. Возникает необходимость в регуляторе, который вырабатывал бы дополнительное регулирующее воздействие, пропорциональное скорости отклонения регулируемой величины от заданного значения $u_д = T_д \frac{d\varepsilon}{dt}$.

Такое регулирующее воздействие используется в дифференциальных и ПИД-регуляторах.

ПИД-регуляторы воздействуют на объект пропорционально отклонению ε регулируемой величины, интегралу от этого отклонения и скорости изменения регулируемой величины: $u = k_д + \frac{1}{T_И}\int_0^t \varepsilon dt + T_д \frac{d\varepsilon}{dt}$

По своим возможностям ПИД-регуляторы являются наиболее универсальными. Используя их, можно получить любой закон регулирования. Структурная схема и закон регулирования идеального или параллельного ПИД-регулятора приведены на рис.1.18.

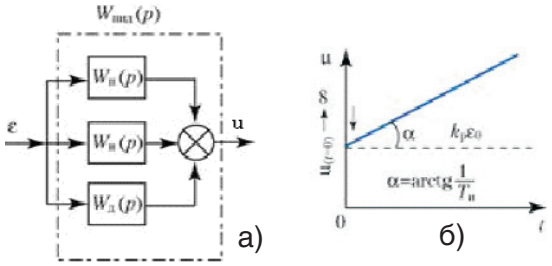


Рис.1.18. Структурная схема ПИД-регулятора (а) и закон ПИД-регулирования (б)

При скачкообразном изменении регулируемой величины ПИД-регулятор в начальный момент времени оказывает мгновенное бесконечно большое воздействие на объект регулирования, затем величина воздействия резко падает до значения, определяемого пропорциональной составляющей, после чего постепенно начинает оказывать влияние интегральная составляющая регулятора. Переходной процесс при этом (рис.1.19) имеет минимальные отклонения по амплитуде и по времени.

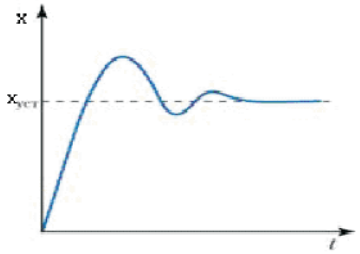


Рис.1.19 Переходной процесс при ПИД- регулировании

Параметрами настройки ПИД-регуляторов являются коэффициент пропорциональности регулятора $k_р$, постоянная времени интегрирования $Т_и$ и постоянная времени дифференцирования $Т_д$.

1.9. АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСТРОЙКИ ПИ- И ПИД- РЕГУЛЯТОРОВ

Для современного производства характерны усложнение технологических процессов и ужесточение допустимых отклонений управляемого процесса от предписанных значений.

Совершенствование методов управления в этих условиях предполагает разработку более сложных математических моделей процессов, позволяющих оптимизировать управление, а использование усложненных моделей порождает проблему задания значений характеристик и параметров модели, нужных для формирования требуемого управления. Однако в большинстве случаев принятые в эксплуатацию системы управления оказываются настроенными далеко не оптимальным образом, что влечет за собой экономические потери.

Проведенные фирмой *Honeywell* исследования качества работы 100 тыс. контуров регулирования, находящихся в эксплуатации не менее пяти лет на 350 предприятиях в различных отраслях промышленного производства, выявили низкое качество работы систем регулирования. Выяснилось, что на различных предприятиях от 49 до 63 % контуров работают со «слабыми» (приближенными к размыканию контура) настройками. В эту группу включены как контуры, настройки которых «ослаблены» для обеспечения работы контура при изменении режима работы объекта (например, нагрузки), так и контуры с необоснованно чрезмерно «ослабленными» настройками (т. е. по существу регуляторы отключены, контур почти разомкнут). В среднем примерно треть контуров работает с нормальными настройками, треть – с «ослабленными», треть – практически разомкнуты «слабыми» настройками. К группе с намеренно «ослабленными» настройками отнесены и контуры с плохими регулирующими органами (люфт, выбег, гистерезис и т. п.). При обследовании было выявлено 16 % таких контуров. Несмотря на большое число плохо работающих контуров, за предыдущие два года настраивались только 4,4 % регуляторов.

Мнение специалистов по наладке систем регулирования о причинах низкого качества их эксплуатации можно сформулировать следующим образом:

— подавляющее большинство контуров функционирует в сложных структурах систем регулирования с перекрестными связями в объекте, через которые эти контуры взаимодействуют (таких контуров может быть 10, а в большинстве случаев 2-3). Настройки каждого контура существенно зависят от характеристик других контуров, в том числе от параметров настройки регуляторов в этих контурах. Поэтому настройка таких систем – очень сложная задача;

— если в многомерной системе неправильно настроен один контур, чаще всего это отражается в появлении периодических колебаний одной частоты с разными амплитудами и фазами во всех взаимодействующих контурах. Определить контур с регулятором – виновником плохой работы системы (корневой контур) – весьма трудная задача.

В составе автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) один инженер, занимающийся настройкой регуляторов, несет ответственность за работу более чем 400 контуров. В этих условиях ликвидировать возникающие в системе предаварийные ситуации можно только наиболее простыми приемами, заключающимися в «ослаблении» настройки регуляторов. При этом будет снижаться качество работы системы, т. е. прибыль, но функционирование системы в этих условиях возможно.

Вряд ли статистика эксплуатации систем автоматического регулирования (САР) в России лучше приведенных данных. Например, на российских тепловых станциях инженер отвечает за 40–50 контуров, однако российским предприятиям приходится работать с менее стабильными характеристиками сырья и материалов, с худшей организацией труда.

Автоматизация процесса настройки во время постоянной эксплуатации объекта управления, во-первых, позволяет сохранить оптимальную настройку системы в течение всего времени работы объекта, несмотря на существующее всегда непредвиденное изменение его свойств, а во-вторых, способствует поиску путей совершенствования заложенных в проект решений, модернизации системы управления.

Как известно, основная концепция проектирования систем автоматического управления техническими и технологическими объектами состоит в следующем. Заданы математическая модель объекта управления и критерий оптимального функционирования системы управления этим объектом со всеми ограничениями; требуется определить алгоритм функционирования управляющего устройства и осуществить его техническую реализацию так, чтобы удовлетворялись все поставленные требования.

Для систем управления сложными технологическими объектами требуется определить еще и информационную структуру системы, т. е. число и местоположение дополнительных каналов связи объекта с управляющим устройством, поскольку подобные системы обычно строятся как многоконтурные и с компенсацией возмущений. Естественно, выбор информационной структуры системы влияет и на математическую модель объекта.

Существует ряд ограничений на возможность получения достаточно хорошей модели объекта управления перед выполнением технического проекта системы управления. Эти ограничения обусловлены как организационными, так и принципиальными причинами.

Одним из важнейших ограничений **организационного порядка** следует считать существующую практику ввода в действие системы управления одновременно с вводом в действие основного технологического оборудования. Это требует выдачи проектной документации на изготовление системы управления практически одновременно с проектом на технологическое оборудование. К началу проектирования системы управления реальный объект еще отсутствует и, следовательно, отсутствует возможность получения его математической модели экспериментальным путем. Получение моделей расчетным путем сопряжено с вводом большого числа упрощающих предположений, допустимость которых невозможно проверить из-за отсутствия эталона для сравнения.

К организационной причине неполноты начальной информации о модели объекта может быть отнесено также сравнительно большое время, необходимое для проекти-

рования, размещения заказов на оборудование, его получение и монтаж. За это время динамические свойства объекта успевают измениться настолько сильно, что первоначальная модель оказывается в значительной степени устаревшей.

Принципиальные ограничения на точность моделей объектов управления, получаемых перед стадией проектирования, связаны с системным характером задачи создания математической модели объекта и возникающими вследствие этого парадоксами системного мышления типа парадоксов иерархичности и целостности. Речь идет о выборе структуры модели и критерия ее приближения к реальному объекту. Этот выбор не только определяется свойствами объекта, но зависит также и от выбора критерия оптимального функционирования системы управления в целом, а следовательно, и от алгоритма функционирования ее управляющей части. Возникает системный парадокс: для получения модели объекта необходимо знать алгоритм функционирования управляющего устройства, для отыскания которого, собственно, и нужна модель объекта.

Неучет этого парадокса может привести к тому, что спроектированная по модели объекта оптимальная система управления после реализации ее на реальном объекте может оказаться не только неоптимальной, но даже неустойчивой. В этом отношении, как показывает анализ, особенно опасными могут оказаться модели объектов, построенные по критериям минимума среднеквадратического или интегрального квадратического приближений, т. е. по критериям, получившим преимущественное применение.

Выход из этого парадокса, как и из всякого парадокса системного мышления, состоит в использовании метода последовательных приближений (итераций), который позволяет, основываясь на первоначальной заведомо неполной информации о модели объекта, постепенно пополнять ее одновременно с оптимизацией алгоритма управления. Организация такой итерационной процедуры «идентификации–оптимизации» должна включать и стадию ввода системы управления в действие.

Необходимо разумное перераспределение задач, решаемых при разработке систем управления технологическими процессами, между отдельными стадиями.

1. На стадии формулировки технического задания, технического и рабочего проектирования намечаются возможные варианты информационных структур системы управления и определяется информационное и техническое обеспечение, достаточное для реализации каждого варианта. Здесь допускается формулировка алгоритмов управления в общем виде; численные значения параметров настройки могут оцениваться с достаточно большой степенью приближения.

В проект, помимо управляющих алгоритмов и реализующих эти алгоритмы технических средств, должны быть заложены как неотъемлемая часть проекта средства автоматизации процесса «идентификации–оптимизации», выполняемого на стадии ввода системы в действие, а также при последующей эксплуатации объекта в целях совершенствования системы.

2. На стадии ввода (внедрения) системы в действие с помощью технических средств и программ, имеющихся в составе системы, осуществляется оптимизация принятых вариантов решений и выбор из них наилучшего.

3. На стадии анализа функционирования системы проводится всестороннее изучение системы с целью:

а) конкретизировать методологию автоматизированной оптимизации настройки применительно к данному объекту и выдачи рекомендаций эксплуатационному персоналу по ее реализации;

б) выявить пути возможного совершенствования системы;

в) пополнить банк данных САПР САУ для математических моделей объектов и оптимальных решений по выбору систем управления для использования этих данных в будущем.

Сформулированная концепция проектирования в полном объеме может быть использована в системах управления, построенных на базе ПЛК, поскольку в таких системах имеется возможность:

а) безболезненного и практически любого изменения алгоритмов и структуры управления непосредственно в процессе пуска системы на действующем объекте;

б) включения в их состав специального математического обеспечения программы идентификации и оптимизации с организацией диалогового режима с наладочным персоналом.

ГЛАВА 2.
БИБЛИОТЕКА АЛГОРИТМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ В ПАКЕТЕ UNITY PRO

Библиотека алгоритмов регулирования в пакете Unity Pro насчитывает свыше 80 блоков FFB [4]. Они разбиты на несколько групп.

В группе базовой библиотеки Base Lib в разделе CLC_INT находятся три функции, позволяющие осуществлять регулирование с целыми числами.

В группе Obsolete Lib в двух разделах (CLC и CLC_PRO) содержится 35 алгоритмов.

В группе CONT_CTL для управления непрерывными процессами насчитывается 45 алгоритмов в шести разделах: Conditioning – для обработки данных измерений и других цифровых сигналов; Controller – для регулирования и автонастройки, Mathematics – специализированные арифметические функции, ориентированные на применение в контуре регулирования; Measurement – для измерений; Output processing – для управления различными типами исполнительных механизмов; Setpoint management – для формирования сигналов задания.

2.1. УПРАВЛЕНИЕ ВВОДОМ/ВЫВОДОМ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ (IO MANAGEMENT)

Библиотека управления аналоговым вводом/выводом при использовании контроллера Quantum содержит разделы Analog I/O Configuration, Analog I/O Scaling, Immediate I/O и Quantum I/O Configuration (рис.2.1).

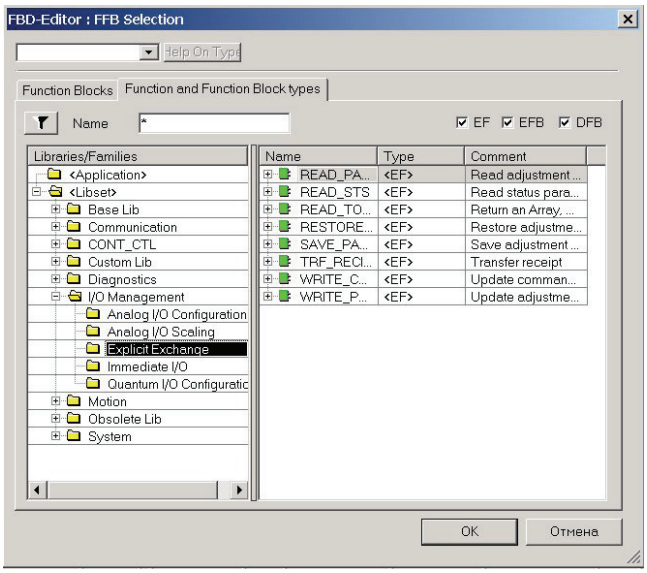


Рис.2.1. Библиотека I/O Management

Библиотека Explicit Exchange применяется для конфигурирования аналоговых сигналов ввода/вывода при использовании контроллера Premium.

Библиотека функциональных блоков и функций I/O Management содержит блоки FFB, которые в своем большинстве являются модульно-независимыми. Изменения прямых адресов входных/выходных параметров автоматически обновляются блоками аналогового ввода/вывода.

Настройка аналоговых модулей ввода/вывода проводится с использованием блоков FFB, входящих в раздел Quantum I/O Configuration библиотеки I/O Management (рис. 2.2).

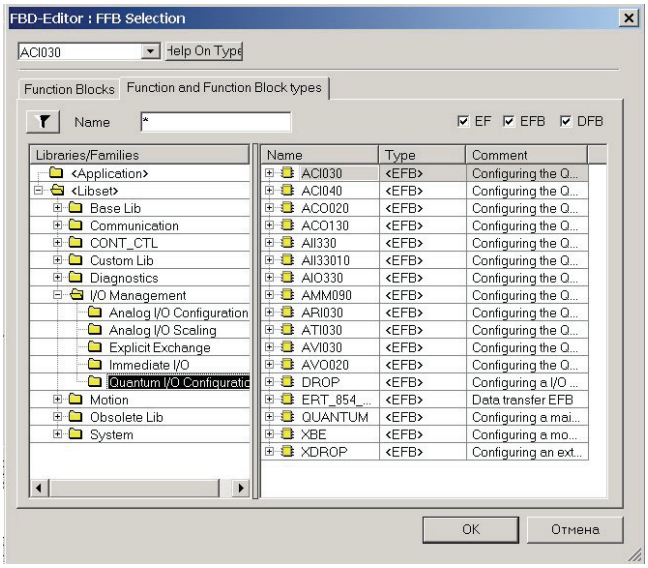


Рис. 2.2. Раздел Quantum I/O Configuration

Для осуществления настройки создается секция, в которую помещается настроечный блок EFB Quantum.

Если используется удаленный ввод/вывод (RIO), распределенный ввод/вывод (DIO) или сеть (NOM), то нужно задействовать для настройки блок EFB Drop. Этот блок применим ко всем трем типам станций. Если используется RIO или NOM, то нужно подключить EFB Drop к слоту RIO-адаптера (CRP) или к модулю NOM. Если же используется DIO, то подключается EFB Drop к слоту процессора. Каждая станция ввода/вывода имеет свой собственный номер, который и следует указать на входе NUMBER у блока EFB Drop.

У каждого аналогового модуля есть свой собственный блок аналогового ввода/вывода. Выбранный блок нужно подключить к соответствующему слоту: EFB Quantum или EFB Drop.

На выходе блок обеспечит данные в формате ANL_IN или ANL_OUT. В дальнейшем эти данные могут быть обработаны через безадресные переменные с использованием масштабирующих блоков.

На рис. 2.3 приведен пример секции настроек CfgAnaIo [2].

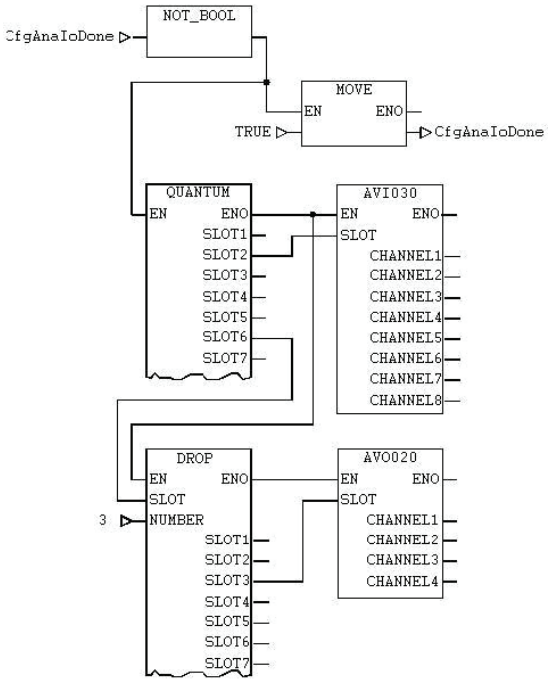


Рис. 2.3. Конфигурирование аналоговых блоков

Безадресная переменная с именем CfgAnaIoDone используется для управления настройкой. Не рекомендуется использовать литеральные значения (константы) для входных слотов блоков конфигурации. Входные слоты должны быть подключены к выходным слотам.

Масштабирование аналоговых значений осуществляется с помощью блоков FFB, входящих в раздел Analog I/O Scaling IO Management библиотеки (рис. 2.4).

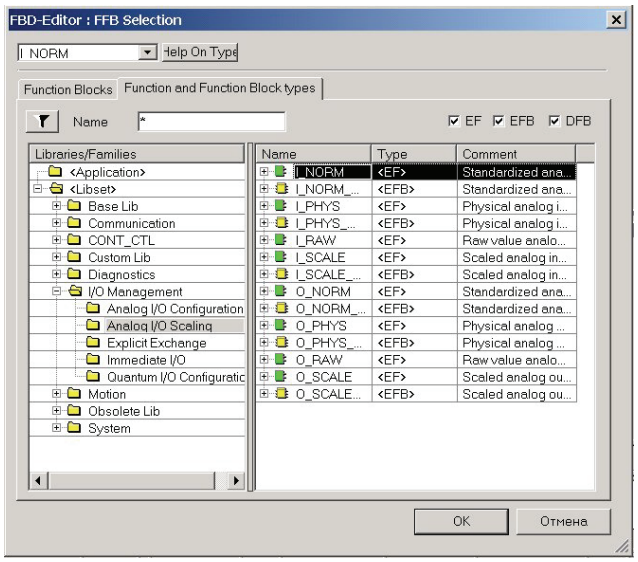


Рис. 2.4. Масштабирующие блоки

Блоки аналогового ввода/вывода работают с аппаратно-независимыми типами ANL_IN и ANL_OUT. Доступны следующие масштабирующие блоки:

- I_RAW, O_RAW – необработанные значения, масштабирование отсутствует;
- I_RAWSIM – необработанные значения, симуляция;
- I_NORM, I_NORM_WARN, O_NORM – нормализация, представление значения в диапазоне от 0,0 до 1,0;
- I_PHYS, I_PHYS_WARN – физический диапазон;
- I_SCALE, I_SCALE_WARN, O_SCALE – масштабированные значения, представленные в пользовательском диапазоне от MN до MX.

Типы данных ANL_IN и ANL_OUT обрабатываются при помощи блоков FFB I_FILTER, I_SET и O_FILTER, O_SET, входящих в раздел Analog I/O Configuration библиотеки IO Management (рис. 2.5).

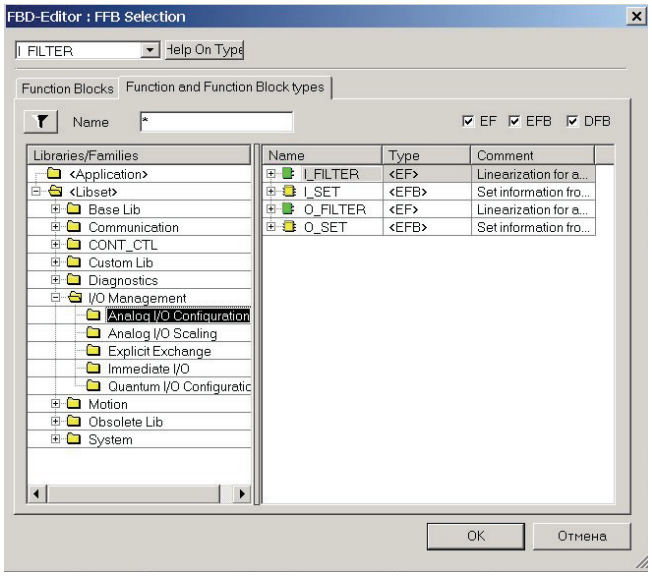


Рис. 2.5. Раздел Analog I/O Configuration

Обычно отладочные блоки не требуются, но иногда необходимо, например, просмотреть значения в оперативной памяти состояния (State RAM), как показано на рис. 2.6.

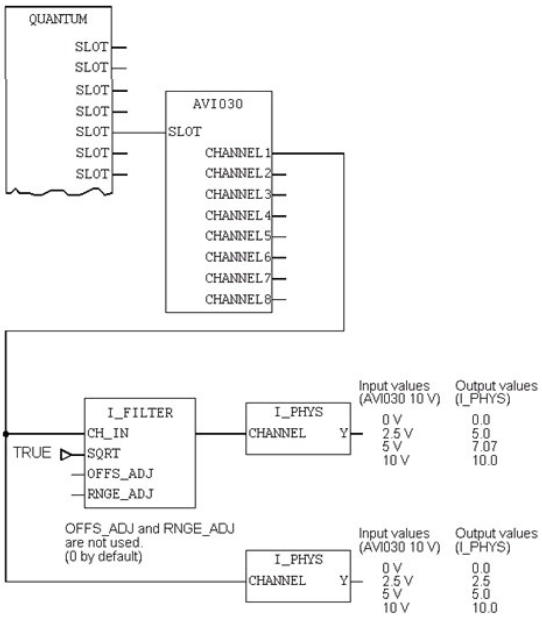


Рис.2.6. Просмотр значения в State RAM

Для более точного наблюдения за выходными значениями рекомендуется осуществлять масштабирование при помощи двух блоков. Первый блок масштабирует аналоговое значение, а второй контролирует, чтобы отмасштабированное значение не выходило за пределы, установленные для данного процесса.

Пример на рис. 2.7 показывает, как можно использовать эти блоки.

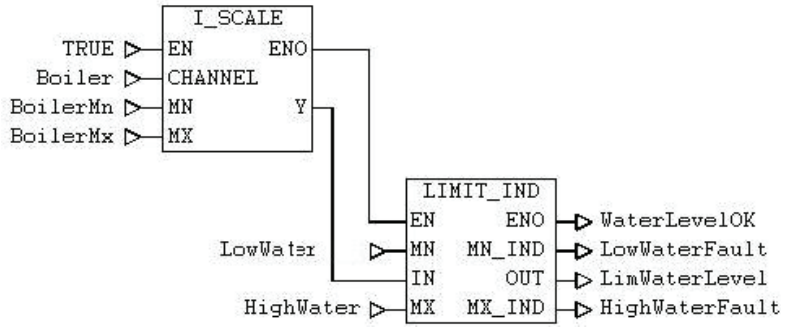


Рис.2.7. Масштабирование с помощью двух блоков

Имеется паровой котел вместимостью 350 л. Входное напряжение изменяется от 0,0 в для 0 л до 10,0 В для 1000 л. ПИ-контроллер обеспечивает наполненность в пределах от 200 до 300 л. Ограничительный блок определяет нарушение границ этого диапазона и ограничивает выход.

Значение переменной BoilerMn равно 0, BoilerMx – 1000, LowWater – 199, HighWater – 301, здесь Boiler – безадресная переменная типа ANL_IN, подсоединенная к блокам FFB AVI030. У вас есть выбор использовать исходное значение с выхода Y масштабирующей функции или ограниченное значение с выхода OUT ограничительного блока.

Использование модулей IMIO_IN и IMIO_OUT, входящих в раздел библиотеки Immediate I/O IO Management (рис. 2.8), позволяет получить информацию о состоянии соответствующего модуля входов/выходов непосредственно в конце каждого цикла выполнения программы.

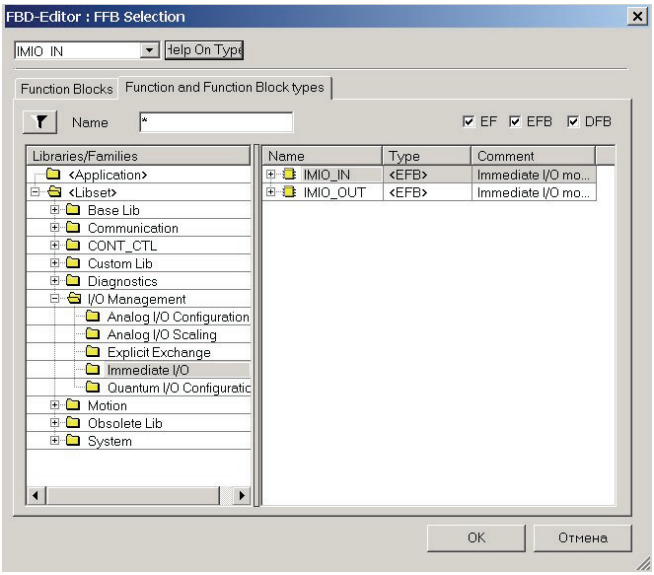


Рис. 2.8. Модули Immediate I/O

2.2. БИБЛИОТЕКА CONT_CTL. НЕПРЕРЫВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Библиотека CONT_CTL (Continuous Control – «Непрерывные системы управления») состоит из 6 разделов элементарных функциональных блоков и функций (FFB), представленных на рис. 2.9.

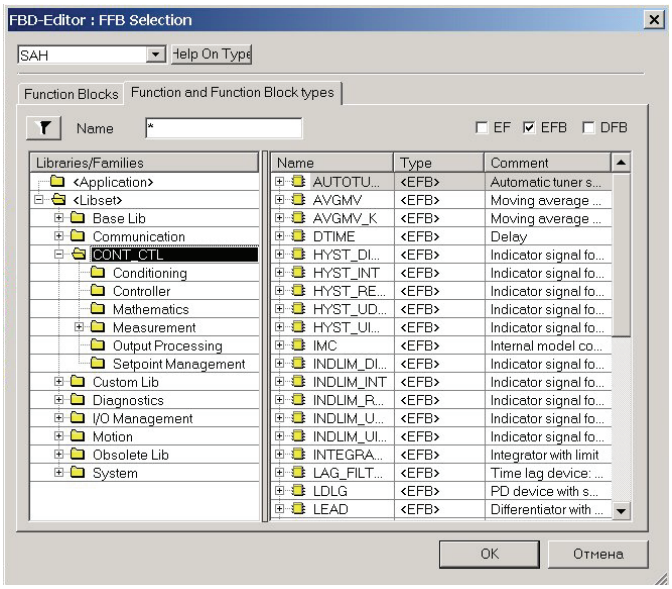


Рис. 2.9. Библиотека CONT_CTL

· Conditioning – устройства обработки данных (обработка данных измерений и других цифровых сигналов).

· Controller – регулятор (блоки регуляторов и автонастройки).

· Mathematics – арифметические операции (специализированные арифметические функции, ориентированные на применение в контуре регулирования).

· Measurement – измерения.

· Output processing – устройства сопряжения с объектом УСО (блоки управления различными типами исполнительных механизмов).

· Setpoint management – формирование сигналов задания (генерирование задающего воздействия и программного задания).

2.2.1. УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ (CONDITIONING)

В этот раздел включены блоки FFB, предназначенные для выполнения процедур, связанных с основными функциями регуляторов, а именно (рис. 2.10):

- измерение регулируемой переменной;
- измерение возмущающего воздействия либо любой другой цифровой переменной.

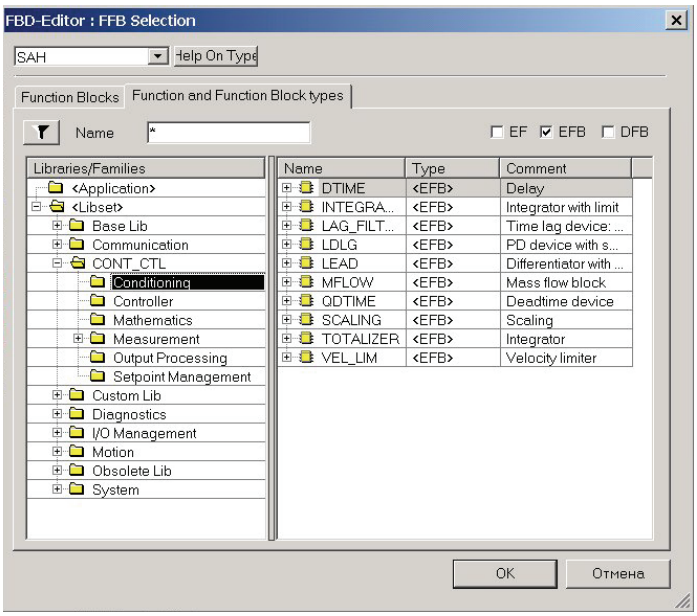


Рис.2.10. Раздел обработки измерений

Здесь представлены алгоритмы динамических преобразований: фильтр 1-го порядка, вычислитель производной со сглаживанием, фазовый корректор на основе форсирующего и апериодических звеньев, интегратор, а также два звена чистого запаздывания и некоторые другие алгоритмы FFB. К ним можно отнести следующие:

DTIME (Dead Time) – задержка. Этот блок реализует функцию чистого запаздывания в виде линий задержки, допускающую параметрическое введение запаздывания для входного сигнала с целью обеспечения для высокоточной реализации либо реализации динамически изменяемого запаздывания;

INTEGRATOR (Integrator with Output Limit) – интегратор;

LAG_FILTER (Lag Element, 1 st Order) – апериодическое звено, фильтр 1-го порядка;

LDLG (Lead/Lag Function with Smoothing) – дифференцирование со сглаживанием, фазовая коррекция на основе форсирующего (дифференцирующего звена первого порядка) и апериодических звеньев;

LEAD (Differentiator with Delay) – дифференцирование с задержкой, вычисление производной со сглаживанием;

MFLOW (Mass Flow Controller) – обработка данных измерения, обработка данных измерения дифференциального давления, получаемых от вакуумного элемента;

QDTIME (Dead Time (Simple)) – задержка (быстрая), функция чистого запаздывания в виде линий задержки, допускающая параметрическое введение запаздывания для входного сигнала с целью обеспечения быстрой, т. е. (Q=Quick) реализации;

SCALING (Scaling) – масштабирование, масштабирование дискретной переменной любого типа;

TOTALIZER (Totalling Unit) – сумматор (накопитель), суммирующая функция, предназначенная для представления интегральной выборки в виде фрагментов и для выполнения анализа в полном объеме. В результате применения этой функции можно интегрировать очень слабые сигналы на фоне весьма существенных значений выборки в целом. Данная функция характеризует свойства каждого отдельного фрагмента, не влияющего на информацию, представленную в полном объеме (интегратор с памятью);

VEL_LIM (Velocity Limiter) – ограничение скорости, ограничение градиента по любому входу промежуточной переменной (ограничение скорости изменения выходного сигнала).

2.2.2. РЕГУЛЯТОРЫ (CONTROLLER)

С помощью блоков FFB, входящих в раздел «Controller», могут осуществляться следующие алгоритмы регулирования и автонастройки (рис. 2.11).

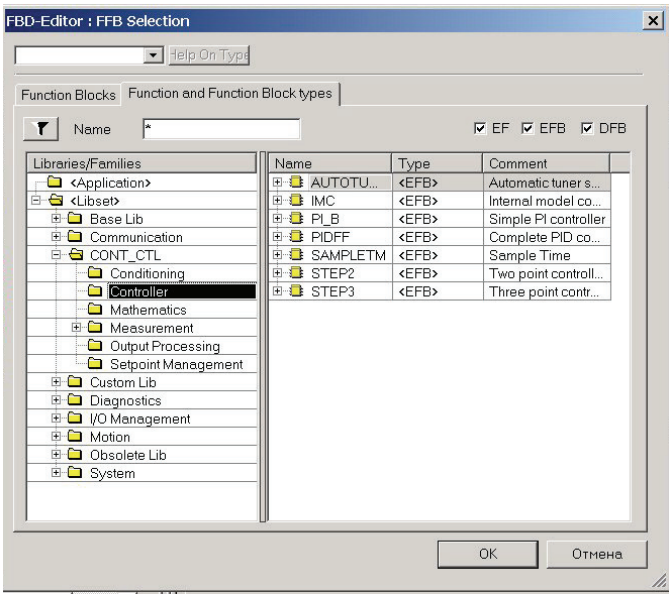


Рис. 2.11. Раздел контроллеры

AUTOTUNE (Automatic Controller Tuning) – автонастройка регуляторов, блок автоматической настройки (автонастройки) регулятора; он существенно упрощает фазу настройки параметров регуляторов PIDFF и PI_B. Этот блок нетрудно подключить со стороны входов блока регулятора, причем процесс автонастройки может быть реализован в любой момент без вспомогательных программных средств.

IMC (Internal Model Controller) – внутренняя модель регулятора.

PI_B (Basic PI Controller) – базовый ПИ-регулятор; этот блок рекомендуется использовать в случае грубой настройки регулятора, когда допустимо применение обычного ПИ-алгоритма; он обладает всеми классическими функциональными признаками, являясь в то же время более простым и доступным при настройке.

PIDFF (Complete PID Controller) – полный ПИД-регулятор; этот блок рекомендуется использовать тогда, когда требуется обеспечить очень высокую точность регулирования (настройки), он обладает самыми полными возможностями в качестве ПИД-регулятора с универсальным набором конфигураций, в том числе позволяет:

· выбрать смешанную или параллельную структуру;

· использовать вход Feed Forward с целью компенсации возмущающего воздействия;

· реализовать механизмы регенерации (препятствующие переполнению интегратора).

SAMPLETM (Sample time) – шаблон времени; этот блок используется для управления блоками после холодного старта с целью снижения требований к CPU в начале цикла сканирования программы.

STEP2 (2-Position On/Off Controller) – двух позиционный регулятор, двухпозиционное реле с петлей гистерезиса; этот регулятор предназначен для формирования реальных сигналов управления в случае единственного исполнительного устройства. При необходимости обеспечить более точное релейное управление можно воспользоваться традиционным регулятором в сочетании с блоком широтно-импульсной модуляции – ШИМ (PWM1).

STEP3 (3-Position On/Off Controller) – трех позиционный регулятор, трехпозиционное реле с зоной нечувствительности и петлей гистерезиса; он предназначен для формирования реальных сигналов управления, если надо управлять двумя исполнительными устройствами. При необходимости обеспечить более точное релейное управление можно воспользоваться традиционным регулятором в сочетании с блоком ШИМ (PWM1).

Следует отметить, что алгоритм формирования управляющего воздействия у регуляторов PIDFF и PI_B реализован в инкрементной форме, ориентированной на управление исполнительными органами при помощи блока SERVO.

Фаза настройки параметров этих двух блоков может стать существенно более простой за счет применения блока автонастройки (AUTOTUNE). Этот блок нетрудно подключить со стороны входов блока регулятора, причем процесс автонастройки может быть реализован в любой момент без вспомогательных программных средств.

2.2.3. АРИФМЕТИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ (MATHEMATICS)

Процесс регулирования связан с использованием арифметических функций, ориентированных на применение в контуре регулирования. Этот раздел Mathematics библиотеки CONT_CTL включает в себя следующие безынерционные блоки FFB (рис. 2.12).

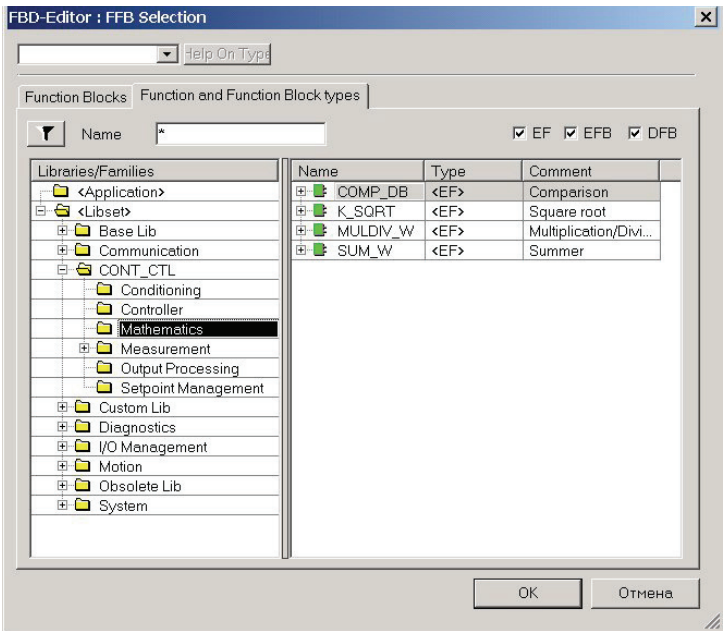


Рис. 2.12. Раздел арифметических операций

COMP_DB (Comparator) – компаратор с зоной нечувствительности и гистерезисом.

K_SQRT (Square Root) – корень квадратный с усечением и весовым коэффициентом.

MULDIV_W (Multiplier/Divider) – умножение/деление с весовым коэффициентом.

SUM_W (Summing Element) – суммирование с весовыми коэффициентами.

2.2.4. ИЗМЕРЕНИЕ (MEASUREMENT)

С помощью блоков FFB, входящих в раздел Measurement, могут выполняться следующие операции (рис. 2.13):

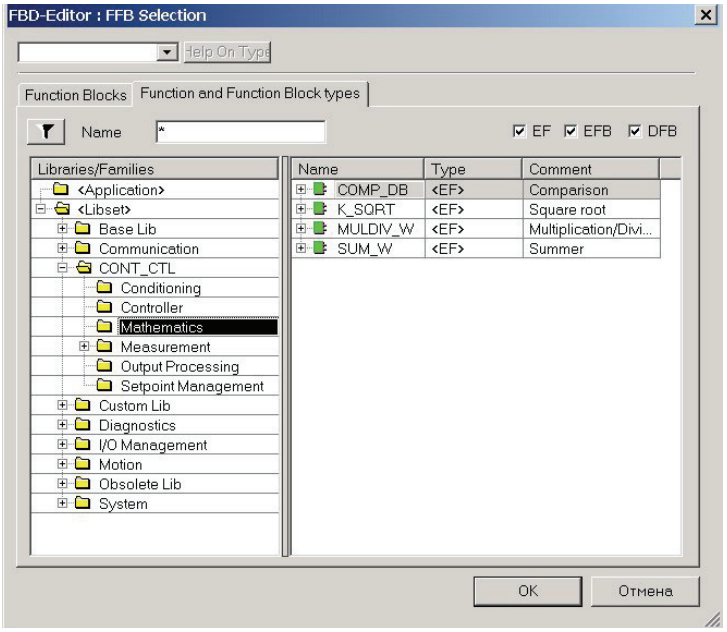


Рис. 2.13.Раздел измерений

AVGMV (Moving average with fixed window size) – скользящее среднее значение с установленным размером буфера (максимум 50 значений); в результате операции на выходе блока вычисляется среднее арифметическое, блок может работать в ручном и автоматическом режиме.

AVGMV_K (Moving average with frozen correction factor) – скользящее среднее значение с замороженным коэффициентом коррекции; в результате операции на входе блока вычисляется среднее арифметическое до 10 000 значений входа;

DEAD_ZONE (Dead zone) – зона нечувствительности;

DEAD_ZONE_REAL (Dead zone) – зона нечувствительности; эти операции применяются, чтобы специальным образом учесть зону нечувствительности в зависимости от коэффициента усиления;

HYST_*** (Indicator signal for maximum value delimiters with hysteresis) – сигнал индикатора для максимальных значений разделителей с гистерезисом; процедура контролирует переменную входа, чтобы обнаружить, превышен ли верхний предел;

INDLIM_*** (Indicator signal for delimiters with hysteresis) – сигнал индикатора для разделителей с гистерезисом; эта процедура применяется, если необходимо контролировать переменную входа, чтобы обнаружить, превышен ли верхний предел или значение меньше нижнего предела;

LOOKUP_TABLE1 (Polygon with interpolation of the 1 st order) – многоугольник с интерполяцией 1-го порядка; эта процедура линеаризует кривую характеристику с помощью интерполятора;

SAH (Detecting and holding a rising edge) – обнаружение и удержание границы сигнала.

2.2.5. УСТРОЙСТВА СОПРЯЖЕНИЯ С ОБЪЕКТОМ (OUTPUT PROCESSING)

С помощью блоков FFB, входящих в данный раздел, могут осуществляться функции ручного управления и управления различными типами исполнительных механизмов (рис. 2.14).

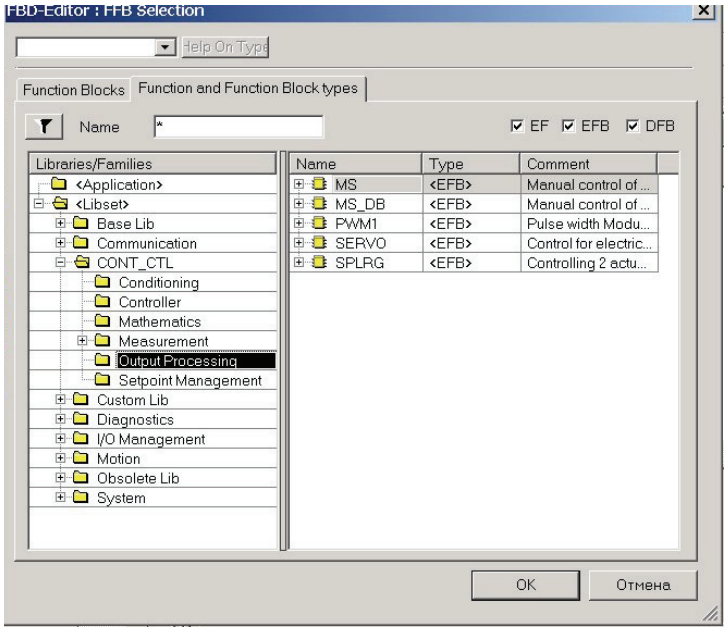


Рис. 2.14. Раздел управления выходами

Зачастую невозможно бывает непосредственно использовать выходной сигнал регулятора для управления исполнительным органом (приводом). Для этого применяются функциональные блоки ручного управления: MS и MS_DB.

MS (Manual Output Control) – специализированный модуль для ручного управления. Несмотря на то, что модули регуляторов рассчитаны на возможность работы в режиме ручного управления, использование специализированного модуля MS для этих целей зачастую не имеет альтернативы.

Ниже перечислены случаи, в которых только лишь блок MS может корректно работать в режиме ручного управления:

- если регулируют вручную значение переменной, отсутствующей среди выходных сигналов контроллера;
- если на выходной сигнал не влияет контур регулирования;
- при большом времени цикла в контуре регулирования (1с или больше).

MS_DB – модуль для ручного управления с зоной нечувствительности. Этот функциональный блок служит для контроля числа выходов, которые могут быть выключены через функциональный блок PWM1 (управляемый аналоговый выход, сервомотор или элемент управления). Контроль может осуществляться через обслуживаемый диалог или непосредственно через программное обеспечение ПЛК.

Управление исполнительными механизмами реализуются блоками: PWM1, SERVO и SPLRG.

PWM1 (Pulse Width Modulation) – блок ШИМ. В простейших случаях релейные исполнительные механизмы реагируют непосредственно на дискретные сигналы

управления блоков типа STEP2 и STEP3. Однако если требуется обеспечить прецизионное управление, то применяют классический регулятор (PIDFF или PI_B) совместно с блоком ШИМ (PWM1).

SERVO (Electric-Servomotor Handler) – блок, используемый, например, в классическом случае применения электродвигателя в контуре регулирования для преобразования сигналов регулятора в сигналы управления электродвигателем.

SPLRG (Controlling 2 actuators) – блок, используемый, в случае, если имеются два привода, связанных с одним и тем же выходным сигналом контроллера. Этот блок рассчитан на работу либо в режиме резервирования (горячего или холодного), либо в режиме согласованной работы (составной привод).

2.2.6. ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ЗАДАНИЯ (SETPOINT MANAGEMENT)

С помощью следующих блоков FFB (рис. 2.15) может осуществляться формирование сигналов задания (генерирование задающего воздействия и программного задания):

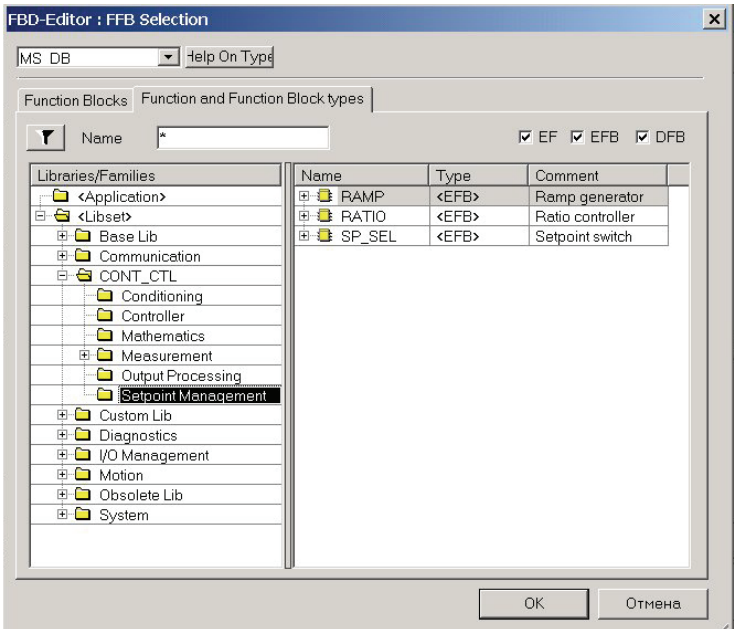


Рис. 2.15.Формирование сигналов задания

RAMP (Ramp Generator) – генератор пилообразных функций,

RATIO (Ratio Controller) – вычисление сигнала уставки,

SP_SEL (Setpoint Selector) – селектор типа уставки.

Подобное разбиение на модули способствует большому выравниванию и упрощению и в то же время предполагает разработку таких функций как, например:

- выполнение измерений при работе в режиме ручного управления;
- плавный (безударное переключение) переход при переключении типа внутреннего/внешнего задания;
- безударность переключения с внешнего на внутреннее задание (программное задание).

Классическая функция выбора сигнала задания (внутреннего или внешнего) не реализована в самих регуляторах, однако предусмотрена в специализированном

модуле SP_SEL.

Возможность генерирования сигнала задания для регулятора обеспечивают блоки:

· RATIO, (если одна регулируемая переменная является функцией другой переменной (относительное управление);

· RAMP, предназначенный для генерирования сигнала задания в виде пилообразной функции.

Во многих функциональных блоках предусмотрена возможность изменения режима работы. Имеется режим слежения (отладки), а также режимы ручного и автоматического управления.

Алгоритмы управления представляют собой циклически повторяющиеся операции, для которых следует знать интервал времени, разделяющий два последовательно выполняемых цикла (период повторения). В функциональных блоках период повторения вычисляется автоматически. Поэтому их можно располагать в любом месте в пределах одной секции или совершенно не заботиться о выборе периода повторения.

Тем не менее, в некоторых случаях бывает необходимо выполнять функции управления в фиксированные моменты времени, например:

· при оптимизации периода повторения программы ПЛК, распределенной на несколько циклов управления;

· при повышении качества переходных процессов за счет исключения смещения выборок в контуре регулирования;

· при минимизации числа включений привода (и др.).

В подобных случаях имеется возможность, в частности, воспользоваться функциональным блоком SAMPLETM, который необходимо соединить с входом EN соответствующих функциональных блоков с контролируемым периодом повторения.

Если же период повторения контура превышает время, равное 1 с, то необходимо применить функциональный блок MS, подключаемый вслед за блоками (PIDFF, PI_B) с тем, чтобы иметь возможность ручного управления теми контурами, в которых отсутствует синхронизация.

Для большинства функциональных блоков формируется слово состояния STATUS. В этих блоках применяются механизмы обнаружения ошибок и их устранения.

Каждый бит параметра STATUS является флагом либо ошибки, либо предупреждения, либо информации. Назначение первых 8 бит слова состояния этих всех блоков одно и то же. Назначение последующих битов (с 8 по 15) определяется индивидуально для каждого блока.

В представленной ниже табл. 2.1 расшифрованы значения битов первого байта слова STATUS, совпадающие для всех блоков. Дальнейшее уточнение можно найти в описании каждого конкретного блока.

Таблица 2.1

Бит	Значение	Тип сообщения
0	1	*Ошибка.* При выполнении операции с плавающей запятой (например, при вычислении корня квадратного из отрицательного числа)
1	1	*Ошибка.* При недопустимом значении переменной, обнаруженном на одном из входов для чисел с плавающей запятой: - либо число не соответствует формату с плавающей запятой, - либо значение числа бесконечно большое полученное, например, на предыдущем шаге вычислений

2	1	Ошибка При делении на нуль в формате числа с плавающей запятой
3	1	Ошибка При переполнении во время выполнения операции с плавающей запятой
4	1	Предупреждение или информация[1] Если входной параметр вышел за границы допустимого диапазона чисел. В блоке используется усеченное внутреннее значение числа
5	1[2]	Информация Если достигнут нижний предел на основном выходе блока
6	1[2]	Информация Если достигнута верхняя граница на основном выходе блока
7	1	Ошибка Если нижняя и верхняя границы масштаба входного параметра идентичны

[1] Когда величина поступает из области хранения параметра пользовательского типа данных (обычно это параметр типа PARA), это вызывает появление предупреждения, и бит 4 примет значение 1. В противоположном случае, когда величина на входе имеет простой тип, не будет никакого сигнала предупреждения, и только бит 4 примет значение 1.

[2] В случае, когда параметры нижней и верхней границ выходного сигнала инвертированы (например, out_min out_max), выходной сигнал блока примет самое малое значение, соответствующее значению out_max.

В случае, когда логический (булев) параметр применяется для того, чтобы различить два режима работы или два состояния блока, часто используются обозначения вида mode1 или mode2 (например, MANU_AUTO, SP_RSP). По умолчанию 0 соответствует обозначению mode1, а 1 – обозначению mode2.

2.3. СИСТЕМЫ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ (CLC_INT)

В группе CLC_INT базовой библиотеки Base Lib находятся три функции, позволяющие осуществлять операции с целыми числами (рис. 2.16).

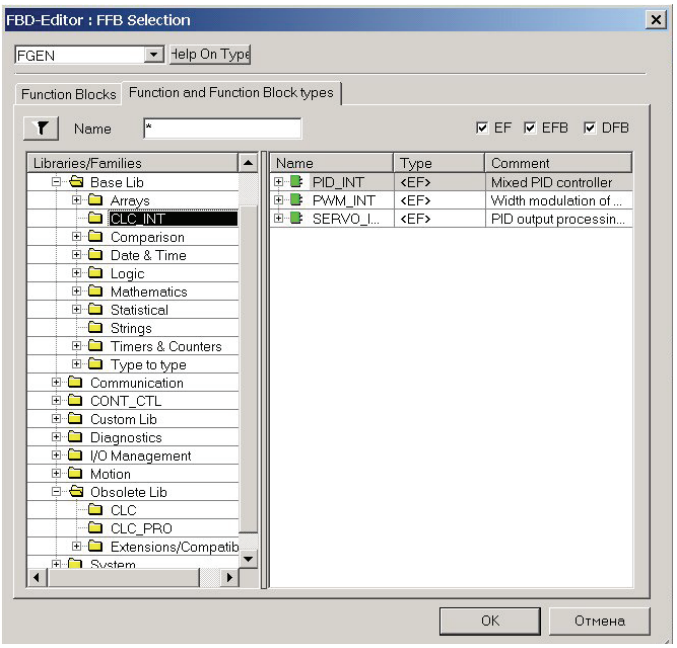


Рис. 2.16. Раздел CLC_INT

Функция PID_INT выполняет ПИД-регулирование переменных на входах и выходах с типом данных INTEGER. Текущее измерение и уставка являются аналоговыми

величинами в диапазоне 0…10000 и аналоговая команда вырабатывается в том же самом диапазоне чисел.

Функция PWM_INT осуществляет регулирование ширины импульса на дискретном выходе ПИД-регулятора. Ширина импульса зависит от выхода ПИД-регулятора и периода модуляции.

Функция SERVO_INT выполняет регулирование двух сервоприводов с дискретным выходом (вверх и вниз).

Перечисленные функции могут применяться в периодических задачах MAST и FAST.

2.4. УПРАВЛЕНИЕ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ (CLC)

С помощью блоков FFB, входящих в раздел CLC библиотеки Obsolete Lib (рис. 2.17), могут осуществляться различные функции регулирования и управления. К этим блокам относятся:

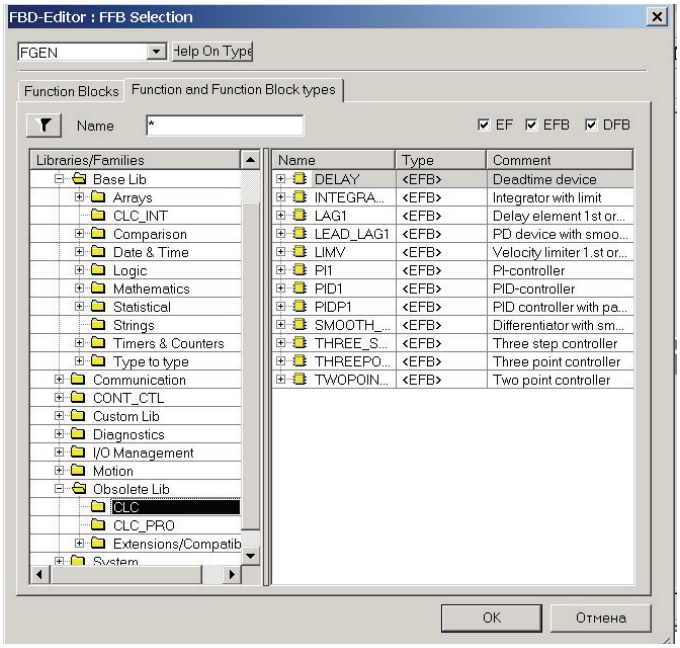


Рис. 2.17. Блоки раздела CLC

DELAY (Delay) – задержка;

INTEGRATOR1 (Integrator with Output Limiting) – интегратор с ограничением выходного сигнала;

LAG1(1st Order Lag) – фильтр первого порядка (апериодическое звено);

LEAD_LAG1 (PD Element with Time Lag) – ПД элемент с постоянной времени (со сглаживанием);

LIMV (Velocity Limiter I st Order) – Ограничитель скорости первого порядка;

PI1 (PI Controller) – пропорционально-интегральный регулятор, ПИ-регулятор;

PID1 (PID Controller) – ПИД-регулятор;

PIDP1 (PI Controller with parallel Structure) – ПИД-регулятор с параллельной структурой;

SMOOTH_RATE (Differentiator with Delay) – дифференциатор с задержкой (со сглаживанием);

THREE_STEP_CON1 (Three Point Controller) – трех позиционный регулятор с двумя обратными связями (ОС);

THREEPOINT_CON1 (Three Point Step Action Controller) – трех позиционный регулятор с одной ОС;

TWOPOINT_CON1 (Two-position Controller) – двух позиционный регулятор с двумя ОС.

Под двухпозиционным регулятором понимается закон регулирования, при котором управляющее воздействие может принимать только два значения в зависимости от значения воздействия отклонения. Аналогично определяются термины «трехпозиционный закон управления» и «многопозиционный закон управления».

Применительно к системам управления, для которых выделено нулевое значение, а также к области положительных и отрицательных значений, различают, например:

- однополярный закон управления;
- двухпозиционный закон управления;
- двуполярный двухпозиционный закон управления;
- двуполярный трехпозиционный закон управления;
- двуполярный многопозиционный закон управления;
- релейный двухпозиционный закон управления.

2.5. УПРАВЛЕНИЕ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ – CLC_PRO (ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛОВ)

С помощью блоков FFB, входящих в раздел CLC_PRO библиотеки Obsolete Lib (рис. 2.18), могут выполняться различные функции регулирования и управления.

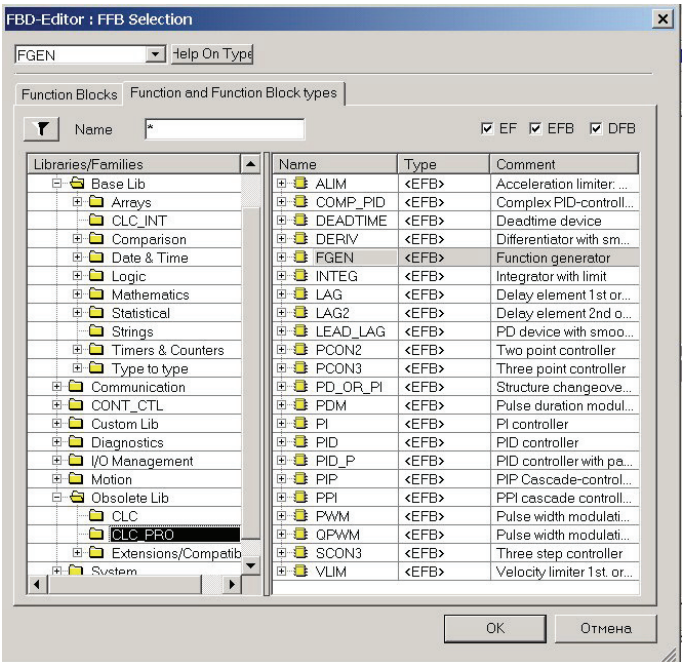


Рис. 2.18. Раздел CLC_PRO

К этим блокам относятся:

ALIM (2nd Degree Slew Rate Limiter) – ограничитель скорости второго порядка;

COMP_PID (Complex PID Controller) – комплексный (сложный, комбинированный) ПИД регулятор;

DEADTIME (Dead Time Element) – элемент временной задержки;

DERIV (Differentiator with Time Lag) – дифференциатор с постоянной времени (со сглаживанием);

FGEN (Function Generator) – генератор функций;

INTEG (Integrator with Output Limiting) – интегратор с ограничением выходного сигнала;

LAG (1 st Degree Time Limiter) – фильтр первого порядка (апериодическое звено);

LAG2 (2nd Degree Time Lag Limiter) – фильтр второго порядка (колебательное звено);

LEAD_LAG (PD Element with Time Lag) – ПД-элемент с постоянной времени;

PCON2 (Two-Position Controller) – двух позиционный регулятор с двумя обратными связями;

PCON3 (Three-Step Controller) – трех позиционный регулятор с двумя обратными связями;

PD_or_PI (Algoritm-Adaptive PD/PI Controller) – адаптивный ПД- или ПИ-регулятор;

PDM (Pulse Duration Modulation) – времяимпульсный модулятор;

PI (PI Controller) – ПИ-регулятор;

PID (PID Controller) – ПИД-регулятор;

PID_P (PID Controller with Parallel Structure) – ПИД-регулятор с параллельной структурой;

PIP (PIP Cascade Controller) – ПИ/П-каскадный регулятор (ПИ-регулятор с ведомым П-регулятором);

PPI (PPI Cascade Controller) – П/ПИ-каскадный регулятор (П-регулятор с ведомым ПИ-регулятором);

PWM (Pulse Width Modulation) – блок ШИМ;

QPWM (Pulse Width Modulation (quick)) – блок ШИМ (быстрый);

SCON3 (Three-Step Step-Action Controller) – трех позиционный регулятор с одной обратной связью;

VLIM (1 st Degree Slew Rate Limiter) – ограничитель скорости первого порядка.

Рассмотрим особенности реализации ПИД-регулятора FFB PID.

Сигнал ошибки регулирования системы определяется как разность между уставкой SP и управляемой переменной PV.

Функциональный блок реализует алгоритм ПИД-регулятора с форматом представления данных типа real, причем выбор значения коэффициента усиления gain и постоянных времени ti и td осуществляется пользователем. Функциональный блок ПИД-регулятор имеет следующие особенности:

- режимы работы – ручной, автоматический и режим останова;
- безударное переключение из ручного режима работы в автоматический;
- ограничение величины регулирующего воздействия;
- индивидуальное подключение компонент П(P), И(I) и Д(D);
- рестарт при зависании;
- защиту от зависания по результатам измерений одной только компоненты И;

Регулируемая постоянная времени дифференцирования (Д), производная (Д) могут определяться либо по выходной переменной PV, либо по сигналу ошибки регулирования системы ERR.

Сигналы EN и ENO можно использовать как дополнительные параметры.

Вид функционального блока PID на структурной схеме приведен на рис. 2.19.

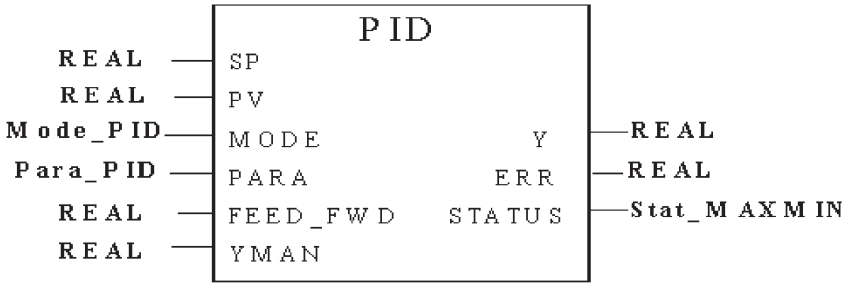


Рис.2.19. Блок ПИД-регулятора

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет следующий вид:

$$W(s) = \frac{U(s)}{G(s)} = K\left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + \frac{T_d \cdot s}{1 + T_a \cdot s}\right),$$

en_d = 1

en_i = 1

en_p = 1

где K – коэффициент усиления, определяемый параметром gain; T_i – постоянная времени интегрирующего звена, равная ti; T_d – постоянная времени дифференцирующего звена, равная td; T_a – постоянная времени, определяемая параметром апериодического звена td_lag .

Регулирующее воздействие U = Y определяется суммой различных составляющих, которые зависят от режима работы ПИД-регулятора:

Y=YP+YI+YD+FEED_FWD.

Возмущающее воздействие

Дифференциальная (D) составляющая

Интегральная (I) составляющая

Пропорциональная (P) составляющая

Ограничение управляющей переменной происходит после суммирования составляющих элементов, т. е. $Y_{min} \langle Y \langle Y_{max}$.

Далее демонстрируется методика расчета составляющих элементов в зависимости от инициализации при помощи входных переменных en_p, en_i и en_d.

В ручном режиме, режиме останова и автоматическом режиме

en_p =”1”; YP = gainERR;

en_p =”0”; YP = 0.

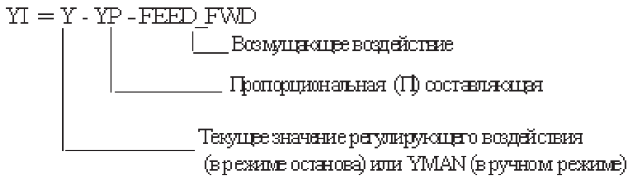
Интегральная составляющая YI в автоматическом режиме вычисляется по формулам

$$YI_{(new)} = YI_{(old)} + gain\frac{dt}{ti}\frac{ERR_{(new)} + ERR_{(old)}}{2}$$

YI = 0 для en_i = 1;

Интегральная составляющая I определяется по формуле трапеции.

Интегральная составляющая YI в ручном режиме и режиме останова рассчитывается по формулам:



для en_i ="1";

YI = 0 для en_i ="0".

Дифференциальная составляющая YD в автоматическом режиме вычисляется по формулам

$$YD_{(new)} = \frac{YD_{(old)}td_lag + tdgain\left(ERR_{(new)} - ERR_{(old)}\right)}{dt + td_lag}$$

для en_d ="1" и d_on_pv="0";

$$YD_{(new)} = \frac{YD_{(old)}td_lag + tdgain\left(PV_{(old)} - PV_{(new)}\right)}{dt + td_lag}$$

для en_d="1" и d_on_pv ="1";

YD = 0 для en_d="0".

В формулах для интегральных составляющих YI и YD приняты следующие обозначения:

ERR – ошибка регулирования (SP-PV);

ERR(new) – значение ошибки регулирования на текущем шаге;

ERR(old) – значение ошибки регулирования на предыдущем шаге;

PV(new) – значение выходной переменной на текущем шаге;

PV(old) – значение выходной переменной на предыдущем шаге;

dt – текущее время сканирования (шаг дискретизации по времени).

Описание параметров блока **PID** приведено в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Параметр	Тип данных	Значение
SP	REAL	Задающее воздействие (уставка)
PV	REAL	Выходная (регулируемая) переменная
MODE	Mode_PID	Режимы работы
PARA	Para_PID	Параметры ПИД-закона регулирования
FEED_FWD	REAL	Возмущающее воздействие
YMAN	REAL	Значение регулирующего воздействия, устанавливаемое вручную
ERR	REAL	Ошибка регулирования САР
Y	REAL	Регулирующее воздействие (U)
STATUS	Stat_MAXMIN	Состояние регулирующего воздействия

Описание параметров **Mode_PID** приведено в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Параметр	Тип данных	Значение
man	BOOL	1 - ручной режим
halt	BOOL	1 - режим останова
en_p	BOOL	1 - инициализация пропорциональной составляющей (P)
en_i	BOOL	1 - инициализация интегральной составляющей (I)
en_d	BOOL	1 - инициализация дифференциальной составляющей (D)
d_on_pv	BOOL	1 - производная (D) берется от выходной переменной PV; 0 - производная (D) берется от ошибки регулирования системы ERR

Описание параметров **Para_PID** приведено в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Параметр	Тип данных	Значение
gain	REAL	Коэффициент пропорциональности (усиления)
ti	TIME	Постоянная интегрирования (период накопления)
td	TIME	Постоянная времени дифференцирующего звена 1-го порядка (скорость нарастания)
td_lag	TIME	Постоянная времени фильтра (апериодического звена)
Y_{max}	REAL	Максимальное значение регулирующего воздействия
Y_{min}	REAL	Минимальное значение регулирующего воздействия

Описание параметров **Stat_MAXMIN** приведено в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Элемент	Тип данных	Значение
qmax	BOOL	1 при $Y \geq Y_{max}$
qmin	BOOL	1 при $Y \leq Y_{min}$

На рис. 2.20 показана структура ПИД-регулятора.

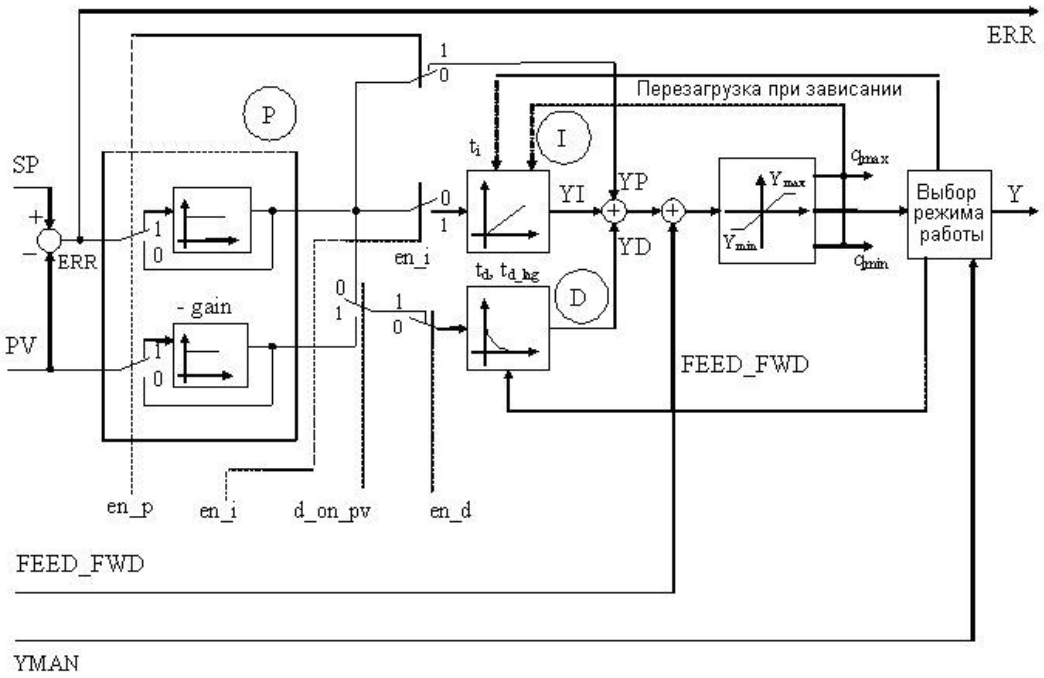


Рис. 2.20. Структура ПИД-регулятора PID

Параметризация функционального блока имеет место, прежде всего для исходных параметров ПИД-регулятора, к которым относятся коэффициент усиления gain, постоянная времени интегратора ti и постоянная времени дифференцирования t_d.

Дифференциальная составляющая имеет сдвиг по фазе в соответствии с постоянной времени фильтра t_{d_lag}. Отношение $\frac{t_d}{t_{d_lag}}$ определяет динамический коэффициент усиления дифференцирующего звена и обычно выбирается в диапазоне значений от 3 до 10. Дифференциальная составляющая определяется либо ошибкой регулирования ERR (d_on_pv = 0), либо выходной переменной PV (d_on_pv = 1).

Если дифференциальная составляющая будет определяться по выходной переменной PV, то в таком случае дифференциальная составляющая не сможет давать скачки в ответ на изменения задающего воздействия (уставки) SP.

В принципе дифференциальная составляющая компенсирует только возмущающие воздействия и вариации выходного сигнала.

Передаточную функцию регулятора можно преобразовать путем изменения знака коэффициента усиления. При положительном знаке возмущения положительный (отрицательный) коэффициент усиления приводит к увеличению (уменьшению) выходной переменной.

Пределы y_{max} и y_{min} удерживают значение регулирующего воздействия в заданном диапазоне, а именно: $y_{min} \le Y \le y_{max}$.

Выходные величины q_{max} и q_{min} сигнализируют о достижении регулирующим воздействием предельных значений: $q_{max} = 1$, если $Y \ge y_{max}$; $q_{min} = 1$, если $Y \le y_{min}$.

Верхний предел y_{max}, ограничивающий регулирующее воздействие, должен выбираться большим, чем нижний предел y_{min}, в противном случае на выходе функционального блока появляется сообщение об ошибке, возникает отказ в формировании функции.

При возникновении ограничения для регулирующего воздействия регенерация системы (при зависании) необходима для того, чтобы убедиться в достоверности интегральной составляющей. Аварийная система предусмотрена только для наблюдения за действием интегральной составляющей. Аварийные пределы идентичны пределам, существующим для регулирующего воздействия. В процессе регенерации не учитываются значения дифференциальной составляющей, чтобы избежать ложных срабатываний от появляющихся пиков дифференциальной составляющей.

Аварийная коррекция интегральной составляющей выполняется таким образом, чтобы не нарушалось соотношение:

$$y_{min} \text{ -YP-FEED_FWD} \leq Y1 \leq y_{max} \text{ -YP-FEED_FWD}$$

При помощи параметров en_p, en_i, en_d можно выбрать несколько типов регуляторов в соответствии с табл. 2.6.

Таблица 2.6

Тип регулятора	en_p	en_i	en_d
П-регулятор	1	0	0
ПИ-регулятор	1	1	0
ПД-регулятор	1	0	1

Интегральную составляющую можно также исключить, положив $t_i = 0$.

При помощи параметров man и halt можно выбрать один из трех режимов работы ПИД-регулятора в соответствии с табл. 2.7.

Таблица 2.7

Режимы работы	man	halt
Автоматический	0	0
Ручной	1	0 или 1
Останов	0	1

В автоматическом режиме регулирующее воздействие Y принимает значения в соответствии с ПИД-законом регулирования с обратной связью, на основе которого формируется выход Y как функция сигналов PV и SP. Регулирующее воздействие ограничено по максимуму величиной y_{max} и по минимуму величиной y_{min}. Пределы изменения выходного сигнала контроллера служат также в качестве уровней регенерации системы при зависании.

Переключение режима работы из автоматического в ручной происходит в нормальном случае без удара, так как выход Y может принимать любые значения в интервале от y_{max} до y_{min}. Тем не менее, он все же приравнивается непосредственно YMAN при переключении режима работы.

Если переключение режима из автоматического в ручной должно быть безударным, несмотря на все эти проблемы, то существуют две возможности.

Можно использовать функцию MOVE для непосредственной пересылки величины сигнала Y в регистр YMAN в соответствии с рис. 2.21.

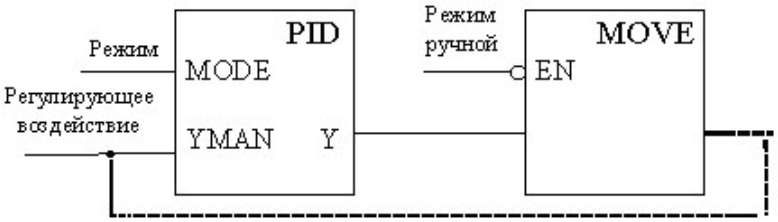


Рис.2.21.Безударное переключение режима работы с использованием блока MOVE

Функция MOVE выполняется исключительно только в автоматическом режиме работы контроллера или в режиме останова (Mode.man = 0). Любое последующее переключение из автоматического режима в ручной осуществляется без удара, когда значения переменных YMAN и Y в пределах одного и того же цикла сканирования идентичны. Далее значение переменной YMAN можно медленно изменять в ручном режиме работы.

Если нет необходимости регулировать вход YMAN в связи с тем, что это константа, можно применить блок ограничения скорости движения (функциональный блок VLIM), как показано на рис. 2.22.

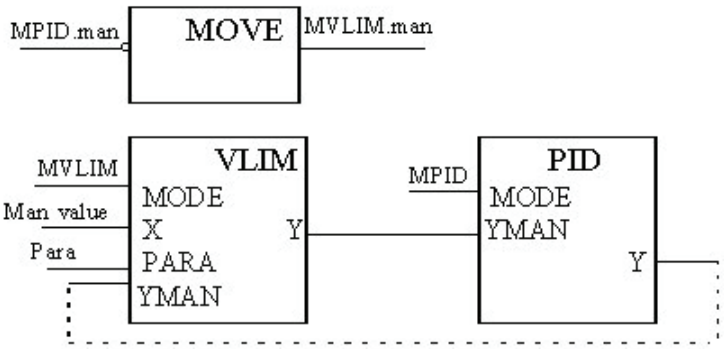


Рис. 2.22. Безударное переключение режима работы с использованием блока VLIM

В автоматическом режиме работы (MPID.man = 0) блок ограничения скорости движения удерживается в ручном режиме работы (при помощи функционального блока MOVE). Таким способом при ручном управлении регулирующее воздействие на выходе ПИД-регулятора (параметр YMAN блока PID) может быть заменено непосредственно собственным воздействием выхода Y, минуя использование входа YMAN блока VLIM. Любое последующее изменение режима работы, (автоматического на ручное) оказывается безударным, так как величины YMAN и Y блока PID одинаковы в пределах одного и того же цикла сканирования.

Величина сигнала YMAN ПИД-регулятора, работающего с параметрами настройки, указанными в векторе Para.rate, появится на выходе с определенным вручную значением (на блоке VLIM), начиная со следующего такта сканирования.

В ручном режиме функционирования заданное значение регулирующего воздействия YMAN непосредственно определяет регулирующее воздействие Y. Однако регулирующее воздействие еще и ограничивается диапазоном допустимых значений ymax сверху и ymin снизу. Внутренние переменные при этом будут изменяться таким

образом, чтобы обеспечить безударный переход из автоматического режима работы в ручной (с учетом действия интегральной составляющей). Ограничение сигнала на выходе контроллера служит также в качестве порога срабатывания схемы регенерации системы при зависании. В данном режиме работы дифференциальная составляющая автоматически обнуляется.

В режиме останова выходной сигнал регулятора остается неизменным; функциональный блок не влияет на регулирующее воздействие Y. Внутренние переменные претерпевают такие изменения, что контроллер (вместе с разрешенной дифференциальной составляющей) может продолжить формирование регулирующего воздействия непрерывно с точки останова. Ограничение сигнала на выходе регулятора позволяет осуществить регенерацию при зависании системы.

Режим останова полезен также при анализе оператором регулирующего воздействия Y при помощи какого-либо внешнего устройства измерения и отображения; при этом компоненты P и I внутри контроллера (т. е. их сумма) дают возможность непрерывно реагировать на влияние извне. В данном режиме работы составляющая D автоматически обнуляется.

Сообщения об ошибке в процессе работы контроллера вырабатываются в случаях, когда появляется неверное число в формате с плавающей запятой на входе YMAN или PV, а также если $y_{max} < y_{min}$.

ГЛАВА 3.
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ НАСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРА В ПАКЕТЕ UNITY PRO

Автонастройка позволяет сэкономить время при установке и эксплуатации контроллера за счет обеспечения устойчивой настройки параметров ПИД-регулятора при изменении параметров технологического процесса или объекта [5].

3.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И ВОЗМУЩЕНИЙ

Математическое описание (передаточная функция) объекта управления обычно имеет следующий вид

$$W_{oy}(s)=\frac{K_o}{T_o s+1}e^{-s\varphi} \quad ,$$

то есть может быть представлена апериодическим звеном и запаздывающим звеном.

Цифровая модель объекта управления, изображенная на рис. 3.1, реализована двумя функциональными блоками из раздела библиотеки CLC_PRO: блоком апериодического звена LAG и блоком звена чистого запаздывания DEADTIME.

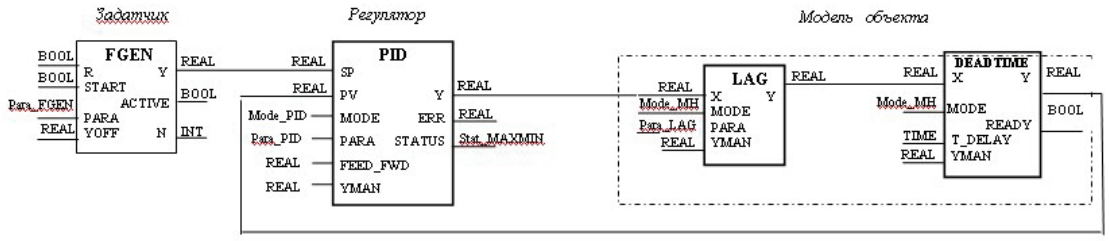


Рис. 3.1. Структурная схема САР с ПИД-регулятором

Здесь функциональный блок FGEN является генератором задающего воздействия g; а блок PID – формирует ПИД-закон регулирования. Блок FGEN обеспечивает возможность формирования задающего и возмущающего воздействий по заданной программе (автоматически).

3.1.1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК LAG (АПЕРИОДИЧЕСКОЕ ЗВЕНО)

Этот блок используется для моделирования заданного объекта управления первого порядка с передаточной функцией

$$W(s)=GAIN\frac{1}{1+s\cdot LAG}$$

Выходное значение вычисляется по формуле

$$Y=Y_{old}+\frac{dt}{LAG+dt}\left(GAIN+\frac{X_{old}+X_{new}}{2}-Y_{old}\right) \quad ,$$

где $Y_{(old)}$ – выходное значение Y от предыдущего цикла; dt – отрезок времени между текущим и предыдущим циклами; $X_{(old)}$ – входное значение X от предыдущего цикла.

Выходное значение Y стремится к значению ступенчатого воздействия входной величины X (ступенька входной величины X изменяется от 0 до 1,0) после задержки. Значение X · GAIN достигается по экспоненциальному закону $e^{t/LAG}$

Изображение блока FFB LAG приведено на рис. 3.2.

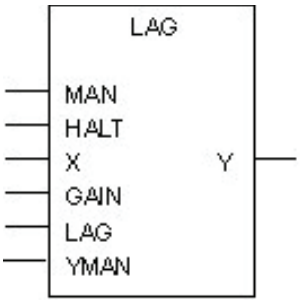


Рис. 3.2. Блок «Апериодическое звено»

Входы FFB:

MAN – включение ручного режима, тип данных BOOL; HALT – включение блокингового режима, тип данных BOOL; X – входное значение, тип данных REAL; GAIN – коэффициент усиления, тип данных REAL; LAG – постоянная времени апериодического звена, тип данных TIME; YMAN – значение при ручном режиме, тип данных REAL.

Выход FFB обозначен Y – выходное значение, тип данных REAL.

Для функционирования модуля необходимо указать коэффициент усиления GAIN и постоянную времени LAG.

Функциональный блок может работать в одном из трех доступных режимов: автоматическом, ручном и блокинговом. В автоматическом режиме функциональный модуль действует в соответствии с заранее установленными параметрами модуля. В ручном режиме ручное значение YMAN передается непосредственно на выход Y. В блокинговом режиме выходное значение Y фиксируется на последнем вычисленном значении. Выходное значение более не обновляется и может быть исправлено оператором.

Используя разные значения входов MAN и HALT, можно включать модуль в разных режимах работы в соответствии с табл. 3.1.

Таблица 3.1

Режим	Вход MAN	Вход HALT
Автоматический	0	0
Ручной	1	0 или 1
Блокинговый	0	1

На рис. 3.3 показано графическое представление процесса работы модуля LAG; входное значение X перемещается на уровень нового значения и значение выхода Y приближается к входному значению X по экспоненциальному закону; показан шаговый отклик для функционального модуля LAG с постоянной величиной GAIN = 1.

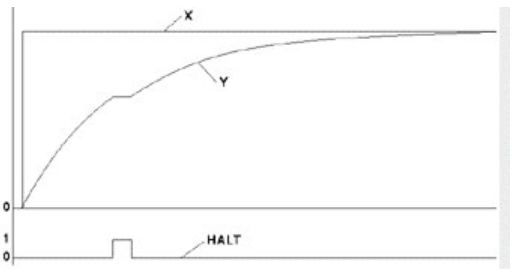


Рис.3.3. Реакция блока LAG на ступенчатое воздействие

3.1.2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК DEADTIME (ЗАПАЗДЫВАНИЕ)

При помощи этого функционального блока входной сигнал задерживается на время, называемое временем чистого запаздывания. Передаточная функция имеет вид

$$G(S) = e^{-sT_delay}$$

Функциональный блок позволяет задерживать сигнал X на время T_delay до момента появления его на выходе Y.

Функциональный блок имеет буферное запоминающее устройство (ЗУ), позволяющее запоминать 128 отсчетов входной последовательности X, т. е. в течение времени T_delay 128 дискретных значений сигнала X будут задерживаться. Управление буфером осуществляется в соответствии с различными режимами работы.

Значение сигнала на выходе Y остается неизменным после холодного или горячего рестарта системы. Внутренняя буферизация значений сигнала X в этом случае начинается с первого элемента.

После изменения времени запаздывания T_delay, а также после холодного или горячего старта системы, выход READY принимает значение 0. Это индикация состояний «не готов» или «буфер пустой».

Параметры EN и ENO могут использоваться в качестве дополнительных параметров.

На рис. 3.4 изображено представление функционального блока DEADTIME.

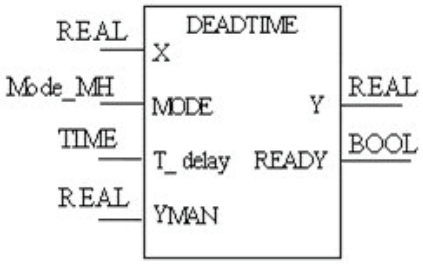


Рис.3.4.Блок запаздывания DEADTIME

В табл. 3.2 и 3.3 приведены параметры обращения к функциональному блоку.

Таблица 3.2

Параметр	Тип данных	Смысловое значение
X	REAL	Входная величина
MODE	Mode_MH	Режим работы
T_delay	TIME	Время чистого запаздывания
YMAN	REAL	Входная величина, используемая при установке значения величины на выходе вручную
Y	REAL	Выход
READY	BOOL	1 - внутренний буфер заполнен 0 - внутренний буфер не заполнен[1]

[1] Например, после холодного или горячего старта или после изменения времени чистого запаздывания.

Таблица 3.3

Параметр	Тип данных	Смысловое значение
MAN	BOOL	1 - ручной режим
HALT	BOOL	1 - режим останова

Функциональный блок поддерживает следующие режимы работы: ручной, останов, автоматический. Параметры man и halt позволяют выбирать один из трех режимов работы в соответствии с табл. 3.4.

Таблица 3.4

Режимы работы	MAN	HALT
Автоматический	0	0
Ручной	1	0 или 1
Останов	0	1

В автоматическом режиме функциональный блок работает по следующим правилам.

При времени сканирования, превышающем величину T_delay/128, текущее значение X запоминается в следующем элементе буферного ЗУ, а самый старый отсчет пересылается на выход Y. В таком случае будут запоминаться менее чем 128 значений сигнала X в течение времени T_delay, что приведет к появлению систематической ошибки, приводящей к запоминанию некоторых отсчетов сигнала X за пределами времени чистого запаздывания.

Пример:

Время сканирования = 100 мс;

T_delay = 10 с;

tin = T_delay /128 = 78 с.

В связи с тем, что tin (разрешающая способность памяти DEADTIME) меньше, чем время сканирования, то каждый отсчет сигнала X может быть занесен в буферное ЗУ. После четвертого обращения к функциональному блоку (через 400 мс) отсчеты величины X заносятся в память буфера уже дважды за цикл, т. е. повторно (так как 3 x 78 = 312 и 4 x 78 = 390).

Если же время сканирования меньше, чем T_delay /128, то не все получающиеся отсчеты сигнала X могут быть занесены в буфер. Так, в некоторых циклах величина X просто не будет запоминаться; в этих случаях выходная величина Y останется без изменений. По истечении интервала времени T_delay выходной сигнал Y может соответственно оставаться неизменным в течение двух (или более) смежных циклов.

В ручном режиме устанавливаемое значение параметра YMAN передается непосредственно в канал управления Y и также заполняет целиком внутренний буфер (READY = 1). По этой причине буфер всегда маркируется как заполненный (READY = 1).

В режиме останова на выходе Y остается последнее вычисленное значение. На выходе оно сохраняется, однако пользователь может установить другое значение. Внутренний буфер продолжает функционировать так же, как и в автоматическом режиме.

На рис. 3.5 приведен пример, характеризующий поведение сигнала на выходе функционального блока.

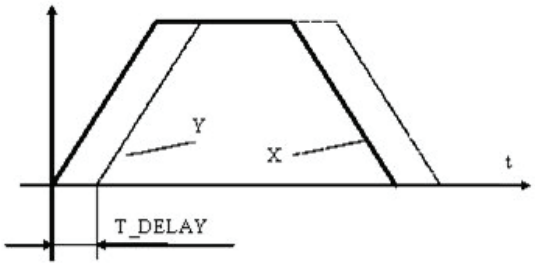


Рис.3.5.Реакция звена запаздывания

Входной сигнал X представляет собой линейно изменяющуюся функцию. Задержанный на время чистого запаздывания T_delay сигнал X поступает на выход Y.

Сообщение об ошибке выдается в случае появления на входе YMAN или X неверного числового значения в формате с плавающей запятой.

3.1.3. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК FGEN (ГЕНЕРАТОР ФУНКЦИЙ)

Уставка SP на ПИД-регулятор вырабатывается функциональным блоком FGEN из библиотеки CLC_PRO (рис. 3.6), который является настраиваемым генератором функций.

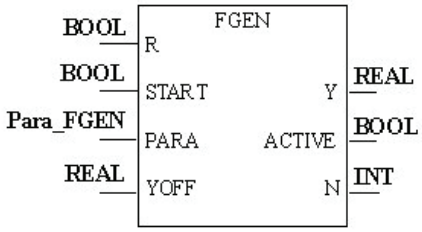


Рис.3.6. Генератор функций

Он генерирует сигнал на выходе Y, параметры которого задаются при помощи переменной типа Para_FGEN.

Генератор функций позволяет получить восемь сигналов различной формы: ступенчатую функцию, линейную, дельта-функцию, пилообразную функцию, прямоугольную волну, трапецеидальную функцию, синусоиду, случайное число.

Параметры EN и ENO можно использовать в качестве дополнительных параметров.

Блок FGEN может быть каскадированным, т. е. путем использования нескольких из перечисленных выше элементарных функций можно сформировать сигналы различной формы и наложить их друг на друга.

Параметр R соответствует команде Reset. Если этот параметр установлен (R = 1), то все действующие функции немедленно терминируют и выходной сигнал Y принимает значение параметра YOFF (смещение). Одновременно счетчик циклов N принимает значение 0, а параметр ACTIVE становится равным логическому 0.

Параметр START (START = 1) определяет начало процесса формирования функции заданной структуры. Выход N суммирует приращение в начале каждого нового

цикла. Если параметр START принимает значение 0, то текущий период выбранной функции идет к завершению. В процессе формирования функции на выходе ACTIVE устанавливается 1. Когда цикл заканчивается, на выходе ACTIVE устанавливается 0.

Периодические колебания, вырабатываемые генератором функций, имеют амплитуду, заданную значением параметра amplitude, т. е. в диапазоне значений от положительно до отрицательного при биполярном сигнале (unipolar = 0) и соответственно от нулевого до максимального положительного значения при униполярном сигнале (unipolar = 1). Колебательные процессы могут быть смещены относительно нулевой отметки посредством параметра YOFF.

Параметр, задающий время нарастания сигнала t_rise, используется только вместе с функциями ramp и trapezoid. В функции saw-tooth время нарастания задается величиной halfperiod-t_off. Для функции delta время нарастания равно 0,5 (trapezoid-t_off).

Всего существует восемь типов функций, которые может сформировать генератор функций. Выбор типа функции осуществляется по значению параметра func_no в соответствии с табл. 3.5. При изменении типа функции предыдущая функция продолжается до конца периода. Функция полностью определяется в формате данных типа Para_FGEN.

В случае если параметр YOFF принимает значение выходного сигнала другого генератора функций, колебания, формируемые обоими генераторами функций, оказываются наложенными друг на друга.

Таблица 3.5

Номер функции	Функция	Параметр					
		amplitude	halfperiod	t_off	t_rise	t_acc	unipolar
1	Ступенчатая (Step)	+	-	-	-	-	-
2	Линейная (Ramp)	+	-	-	+	+	-
3	Пилообразная (Sawtooth)	+	+	+	halfperiod-t_acc	+	+
4	Дельта (Delta)	+	+	+	(halfperiod-t_acc)/2	+	+
5	Прямоугольная волна (Square)	+	+	+	-	+	+
6	Трапецеидальная (Trapezoid)	+	+	+	+	+	+
7	Синусоидальная (Sine)	+	+	+	-	-	+
8	Случайное число (Random Number)	+	-	-	-	-	+

Трапецеидальная функция выбирается в качестве основной при определении параметров (рис. 3.7).

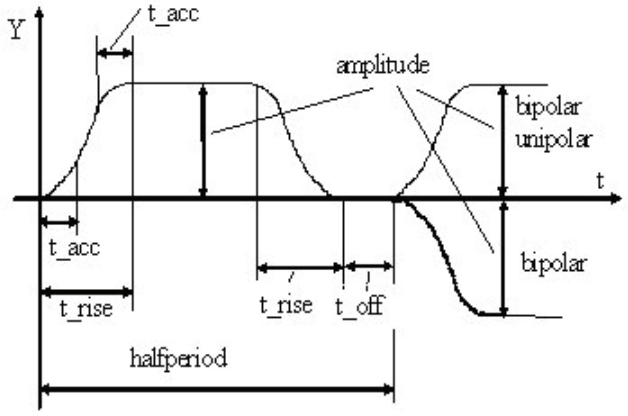


Рис.3.7.

Амплитуда униполярной функции задается при помощи параметра amplitude. Амплитуда биполярной функции удваивается и складывается из положительной амплитуды и отрицательной амплитуды. Параметр halfperiod определяет продолжительность половины периода, параметр t_off – время ожидания. Для генерации трапецеидальной функции требуется еще указать время нарастания сигнала t_rise. Это время, в течение которого сигнал нарастает от нулевого значения до амплитудного. Это время также принимается в качестве времени спада сигнала от амплитудного уровня снова до нулевого.

При генерировании ступенчатой функции выход будет принимать значение Y = YOFF, когда START = 0, и Y = YOFF + amplitude, когда START = 1. Постоянные времени (t_off, t_rise, t_acc) не используются в этой функции. На выходе счетчика N значение выхода получает элементарное приращение при каждом новом совершении перехода 0→1 на входе START. Для этого типа функции не существует двухполярного режима работы, т. е. параметр unipolar не используется.

У линейной функции выходная величина Y нарастает, начиная со значения Y = YOFF до значения Y = YOFF + amplitude. Значение выходной величины Y упадет опять до значения YOFF в случае, если параметр START примет значение 0. Время нарастания определяется постоянными t_rise и t_acc. Время, необходимое для нарастания от значения Y = YOFF до Y = YOFF + amplitude, определяется параметром t_rise. На форму сглаживания влияет параметр t_acc. Выход N получает приращение при каждом новом переходе 0→1 входного параметра START. Эта функция не имеет биполярной формы, т. е. величина параметра unipolar не имеет значения.

При генерировании случайных чисел (random number) выход Y устанавливается произвольно в интервале YOFF ≤ Y ≤ Y OFF + amplitude в униполярном режиме и YOFF – amplitude ≤ Y ≤ YOFF + amplitude в биполярном режиме. Постоянные времени (t_off, t_rise, t_acc) у этой функции не играют роли. Выход N получает приращение при каждом новом переходе типа 0→1 входного сигнала START.

3.2. ПРОГРАММИРОВАНИЕ, ОТЛАДКА И УПРАВЛЕНИЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ

Если требуется обеспечить очень высокую точность регулирования (настройки), то рекомендуется пользоваться блоком PIDFF, обладающим самыми полными возможностями в качестве ПИД-регулятора с универсальным набором конфигураций. Это выбор смешанной или параллельной структуры, использование входа Feed Forward в целях компенсации возмущающего воздействия, механизмы регенерации.

Если же достаточно применить простой ПИ-регулятор, то рекомендуется пользоваться блоком PI_B. Этот блок имеет все классические возможности регулятора, но более прост в эксплуатации.

3.2.1. РЕГУЛЯТОР PI_B

Функциональный блок PI_B (рис. 3.8) осуществляет реализацию смешанного ПИ-алгоритма (последовательный/параллельный).

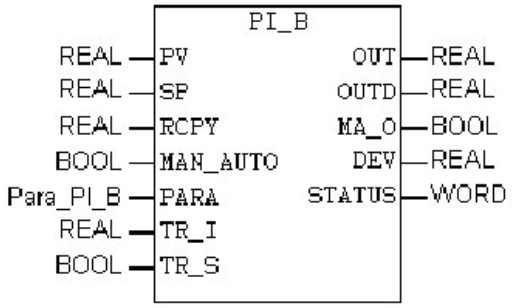


Рис.3.8. PI_B регулятор

Блок PI_B можно применять для решения большинства классических задач управления. Блок отличается относительной легкостью использования и экономичностью системных ресурсов.

Блок PI_B позволяет:

- вычислять с помощью приращений (инкрементное вычисление) пропорциональную и интегральную составляющую;
- задавать уставки, переменную процесса и значения выхода в физических единицах измерения;
- устанавливать режим прямого и обратного счета;
- использовать процесс интегрирования за пределами блока (вход RCPY);
- задавать зону нечувствительности (dead band);
- подавать на выход как абсолютное значение переменной, так и её приращение;
- задавать верхнюю и нижнюю границы выхода;
- вычислять значение систематической ошибки на выходе;
- выбирать режим работы (автоматический/ручной);
- устанавливать режим слежения (отладки) Tracking Mode;
- задавать верхнюю и нижнюю границы уставок.

Обычно с блоком PI_B используются следующие функциональные блоки: AUTOTUNE – для автонастройки коэффициентов ПИ-регулятора; блок SP_SEL – для выбора начальных значений уставок и блок ручного управления MS.

Передаточная функция имеет следующий вид:

$$OUT = kp\left(1 + \frac{1}{ti \cdot p}\right)IN.$$

Вид формулы изменяется в зависимости от того, какой тип алгоритма применяется – абсолютный или инкрементный.

При абсолютном алгоритме (ti = 0)

$$OUT = TermP + outbias;$$

$$OUTD = OUT_{(new)} - OUT_{(old)}.$$

При инкрементном алгоритме (ti<>0)

$$OUTD = TermP + TermI;$$

$$OUT = OUT_{(old)} + OUTD_{(new)},$$

где TermP – величина пропорциональной составляющей (action); TermI – величина интегральной составляющей; (new) – значение, полученное при текущем выполнении блока; (old) – значение, полученное на предыдущем выполнении блока.

Описание параметров блока PI_B приведено в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Обозначение	Тип	Описание
	PI_B	
PV	REAL	Регулируемая переменная
SP	REAL	Уставка
RCPY	REAL	Копия фактического воздействия
MAN_AUTO	BOOL	Режим работы контроллера: 0 - ручной (manual); 1 - автоматический (auto)
PARA	Para_PI_B	Производный тип данных
TR_I	REAL	Инициализация входа
TR_S	BOOL	Порядок инициализации
OUT	REAL	Значение выхода (абсолютное)
OUTD	REAL	Значение приращения выхода (разница между текущим значением выхода и значением, полученным на предыдущем шаге)
MA_O	BOOL	Текущий режим работы блока: 1 - автоматический; 0 - либо ручной, либо режим слежения (трассировки)
DEV	REAL	Величина рассогласования (PV-SP)
STATUS	WORD	Состояние
	Para_PI_B	
id	UNIT	Зарезервировано для функции автонастройки
pv_int	REAL	Нижняя граница регулируемой величины
pv_sup	REAL	Верхняя граница регулируемой величины
out_inf	REAL	Нижняя граница выхода
out_sup	REAL	Верхняя граница выхода
rev_dir	BOOL	0 - обратный режим; 1 - прямой режим
in_rcpy	BOOL	1 - использовать вход RCPY
kp	REAL	Коэффициент усиления пропорциональной составляющей
ti	TIME	Постоянная времени интегрирования
dband	REAL	Зона нечувствительности
outbias	REAL	Ручная компенсация систематической ошибки

Абсолютная форма алгоритма (П-регулятор) используется при отсутствии интегральной составляющей (ti = 0). В этом случае сначала вычисляется значение выхода OUT, а затем разница значений выходов (OUTD) – текущего и полученного на предыдущем шаге.

Алгоритм в инкрементной форме (ПИ-регулятор) применяется, если присутствует интегральная составляющая (ti<>0). При этом сначала вычисляется значение разницы OUTD, а затем – абсолютное значение выхода OUT по формуле

$$OUT_{(new)} = OUT_{(old)} + OUTD.$$

Алгоритм позволяет использовать выходной поток блока SERVO для управления астатическими процессами.

Кроме того, инкрементная форма алгоритма позволяет выносить значение интегральной составляющей за пределы блока (при en_rcpy = 1). в случае, когда фактическое значение отличается от рассчитанного регулятором (разомкнутая система), в вычислениях лучше использовать реальное значение. Если доступно последнее вычисленное значение, оно должно быть подано на вход RCPY и значение параметра en_rcpy должно быть равно 1. Тогда при вычислении в блоке выражение

$$OUT_{(new)} = OUT_{(old)} + OUTD$$

принимает вид

$$OUT_{(new)} = RCPY + OUTD.$$

Алгоритм в инкрементной форме особенно полезен при каскадировании контуров или контуров с блоком автовыбора. В этом случае нет ограничения на значение выхода OUT.

Использование **зоны нечувствительности** позволяет сгладить всплески величины рассогласования внутри этой зоны (а именно обратить их в нуль), как показано на рис. 3.9.

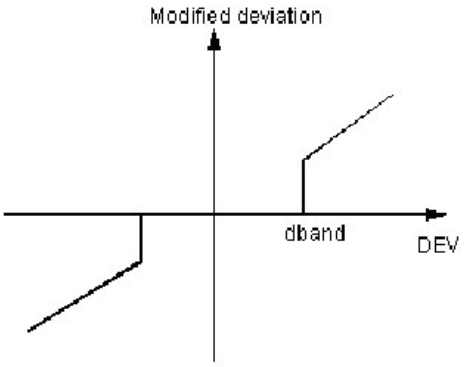


Рис.3.9. Зона нечувствительности

К другим особенностям алгоритма можно отнести следующее:

- использование параметра outbias позволяет обеспечить точность срабатывания при отсутствии интегральной составляющей (ti = 0).

Во всех режимах работы значение выхода OUT ограничено отрезком [out_inf,out_sup]. Если это значение, вычисленное блоком (или заданное пользователем), выходит за пределы данного отрезка, оно будет усечено по границам отрезка. Однако на значение OUTD, полученное в инкрементной форме, такие ограничения не накладываются, что позволяет использовать блок PI_B для управления блоком SERVO (астатическое управление с обратной связью).

• выбор режима прямого/обратного direct/reverse счета можно провести с помощью параметра rev_dir.

• задание нижней и верней границы уставки осуществляется с помощью параметров pv_inf и pv_sup.

• блок PI_B может работать в режиме чистого интегратора (при kp = 0).

Функциональная схема регулятора PI_B приведена на рис. 3.10.

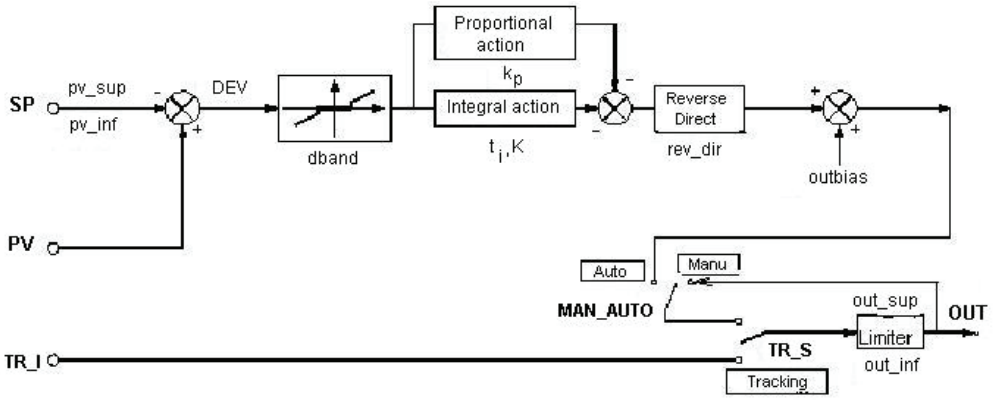


Рис.3.10.Функциональная схема PI_B-регулятора

Функциональный блок PI_B работает в трех режимах: автоматическом, ручном и в режиме слежения (отладки). Эти режимы могут быть определены с использованием входов MAN_AUTO и TR_S. Режим слежения имеет более высокий приоритет, чем остальные.

В автоматическом режиме TR_S = 0; MAN_AUTO = 1.

В ручном режиме TR_S = 0; MAN_AUTO = 0.

В режиме слежения TR_S = 1; вход MAN_AUTO равен 0 или 1.

В автоматическом режиме выходы OUT и OUTD являются результатом вычислений, выполняемых блоком.

При ручном режиме работы блок не вычисляет значение выхода OUT, позволяя оператору непосредственно изменять это значение.

В режиме слежения значение входа TR_I копируется на выход OUT.

При использовании инкрементной формы алгоритма (ti<>0) переключение между режимами осуществляется плавно (без скачков), в случае абсолютной формы (ti = 0) переключение вызывает всплеск.

В абсолютной форме алгоритм (ti = 0) имеет вид

$$OUT = TermP + outbias;$$

$$OUTD = OUT_{(new)} - OUT_{(old)};$$

$$OUT = limiter(OUT);$$

$$TermP = direction \cdot k_p \cdot DEV.$$

В инкрементной форме алгоритм (ti<>0) выглядит так:

$$OUT = TermP + Termi;$$

$$OUT = OUT_{(old)} + OUTD_{(new)} \text{ (if en_rcpy = 0);}$$

$$OUT = RCPY + OUTD_{(new)} \text{ (if en_rcpy = 1);}$$

$$OUT = limiter(OUT);$$

$$TermP = direction \cdot k_p \cdot [\Delta(DEV)];$$

$$Termi = sens \cdot k_p \cdot dt/ti \cdot DEV \text{ (if } k_p <> 0).$$

В случае kp = 0 (т. е. чистый интегратор) значение TermI вычисляется по формуле

$$TermI = sens\frac{out_\sup - out_\inf}{pv_\sup - pv_\inf}\frac{dt}{ti}DEV.$$

В приведенных уравнениях:

- TermP – величина пропорциональной составляющей (action);
- TermI – величина интегральной составляющей;
- (new) – значение, полученное на текущем выполнении блока;
- (old) – значение, полученное на предыдущем выполнении блока;
- direction – направление. Если rev_dir = 1, то значение direction, равное +1, показывает, что положительное (PV–SP) рассогласование увеличивает значение выхода. Если rev_dir = 0, то значение direction, равное –1, показывает, что положительное (PV–SP) рассогласование уменьшает значение выхода;
- dt – время, прошедшее с момента последнего выполнения (execution) блока;
- Δ – $\Delta[x(t)] = x(t) - x(t - 1)$;
- limiter – функция ограничения значения выхода блока.

3.2.2. РЕГУЛЯТОР PIDFF

При сложных процессах управления рекомендуется применять блок PIDFF.

Функциональный блок PIDFF (рис.3.11) представляет собой реализацию ПИД-алгоритма с возможностью выбора смешанной или параллельной структуры.

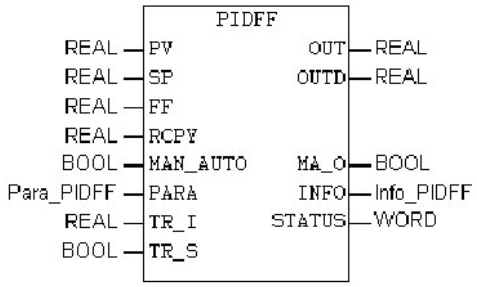


Рис.3.11. Блок ПИД-регулятора PIDFF

Блок PIDFF позволяет:

- вычислять с помощью приращений (инкрементное вычисление) пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие;
- использовать два механизма регенерации;
- задавать уставки, переменную процесса и значения выхода в физических единицах измерения;
- устанавливать режим прямого и обратного счета;
- брать производную от значения переменной процесса или величины отклонения;
- применять временнэю параметризацию производной;
- уменьшать перерегулирование;
- использовать процесс интегрирования за пределами блока (вход RCPY);
- устанавливать прямую связь для компенсации возмущений (использование входа Feed Forward для компенсации);

- задавать зону нечувствительности (dead band);
- подавать на выход как абсолютное значение переменной, так и ее приращение;
- задавать верхнюю и нижнюю границы выхода как зависимости от режима функционирования;
- определять предельное отклонение выходного сигнала;
- вычислять значение систематической ошибки на выходе;
- выбирать режим работ (автоматический или ручной);
- устанавливать режим слежения (отладки) Tracking Mode;
- задавать верхнюю и нижнюю границы уставок.

Обычно с блоком PIDFF используются следующие функциональные блоки: AUTOTUNE – для автонастройки коэффициентов ПИД-регулятора; блок SP_SEL – для выбора начальных значений уставок и блок ручного управления MS.

В зависимости от того, какая структура используется (смешанная или параллельная), передаточная функция имеет различный вид.

При смешанной структуре

$$OUT = kp\left(1+\frac{1}{ti\cdot p}+\frac{td\cdot p}{1+\left(\frac{td}{kd}\right)\cdot p}\right)IN$$

При параллельной структуре

$$OUT = \left(kp+\alpha\cdot\frac{1}{ti\cdot p}+\alpha\cdot\frac{td\cdot p}{1+\left(\frac{td}{kd}\right)\cdot p}\right)IN$$

с коэффициентом масштабирования, равным α,

$$OUT = \frac{out_\sup - out_\inf}{pv_\sup - pv_\inf}$$

Данные формулы изменяются в зависимости от того, какая форма алгоритма используется: вычисление абсолютных значений (абсолютная форма) или вычисление приращений (инкрементная форма).

Абсолютная форма (если ti = 0, т. е. ПД-регулятор):

$$OUT = TermP + TermD + TermFF + outbias;$$

$$OUTD = OUT_{(new)} - OUT_{(old)}.$$

Инкрементная форма (если ti № 0, т. е. ПИД-регулятор):

$$OUTD = TermP + TermI + TermD + TermFF;$$

$$OUT = OUT_{(old)} + OUTD_{(new)},$$

где TermP – значение пропорциональной составляющей; TermI –значение интегральной составляющей; TermD – значение дифференциальной составляющей; TermFF – значение компенсирующего воздействия (компенсация возмущений); (new) – значение, полученное при текущем вычислении блока; (old) – значение, полученное на предыдущем шаге.

Описание параметров PIDFF приведено в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Обозначение	Тип	Описание
PIDFF		
PV	REAL	Регулируемая переменная
SP	REAL	Уставка
FF	REAL	Вход Feed Forward
RCPY	REAL	Копия фактического воздействия
MAN_AUTO	BOOL	Режим работы контроллера: 0 - ручной; 1 - автоматический
PARA	Para_PIDFF	Производный тип данных
TR_I	REAL	Инициализация входа
TR_S	BOOL	Порядок инициализации
OUT	REAL	Значение выхода (абсолютное)
OUTD	REAL	Значение приращения выхода (разница между текущим значением выхода и значением, полученным на предыдущем шаге)
MA_O	BOOL	Текущий режим работы блока: 1 - автоматический; 0 - либо ручной, либо режим слежения
INFO	Info_PIDFF	Информация
STATUS	WORD	Состояние
Para_PIDFF		
id	UNIT	Зарезервировано для функции автонастройки
pv_int	REAL	Нижняя граница регулируемой величины
pv_sup	REAL	Верхняя граница регулируемой величины
out_inf	REAL	Нижняя граница выхода
out_sup	REAL	Верхняя граница выхода
rev_dir	BOOL	0 - обратный режим; 1 - прямой режим;
mix_par	BOOL	0 - ПИД-регулятор со смешанной структурой; 1 - ПИД-регулятор с параллельной структурой
aw_type	BOOL	Тип механизма регенерации
en_rcpy	BOOL	1 - использовать вход RCPY
kp	REAL	1 - использовать вход RCPY
ti	TIME	Коэффициент усиления пропорциональной составляющей
td	TIME	Постоянная времени интегрирования
kd	REAL	Постоянная времени дифференцирования
pv_dev	BOOL	Коэффициент усиления дифференциальной составляющей
		Тип дифференцирования: 0 - дифференцирование регулируемой величины; 1 - дифференцирование отклонения
Para_PIDFF		
bump	BOOL	Используется при переводе регулятора из режимов manual и tracking в режим auto: 0 - переключение без всплесков; 1 - переключение со всплесками

Окончание таблицы 3.7

Обозначение	Тип	Описание
dband	REAL	Зона нечувствительности
gain_kp	REAL	Коэффициент усиления при пропорциональной составляющей внутри зоны нечувствительности dband
ovs_att	REAL	Восстановление превышения
outbias	REAL	Ручная компенсация систематической ошибки
out_min	REAL	Ручная компенсация систематической ошибки
out_max	REAL	Нижний предел выхода
outrate	REAL	Верхний предел выхода
ff_inf	REAL	Предельное изменение выхода
ff_sup	REAL	Нижняя граница входа FF (Feed Forward)
otff_inf	REAL	Верхняя граница входа FF
otff_sup	REAL	Нижняя граница выхода out_ff
Info_PIDFF		
dev	REAL	Величина рассогласования (PV-SP)
out_ff	REAL	Значение составляющей компенсации возмущений (Feed Forward)

Выбор структуры осуществляется с помощью параметра mix_par:

- если mix_par = 0, то структура – смешанная, т. е. вычисление пропорциональной составляющей имеет место после вычисления интегральной и дифференциальной составляющих. При этом используемый коэффициент усиления K здесь эквивалентен k_p;
- если mix_par = 1, то структура – параллельная, т.е. параллельно вычисляются пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие. В этом случае коэффициент усиления k_p не применяется к интегральной и дифференциальной составляющим. Коэффициент усиления K в этом случае – просто соотношение между шкалой значений выхода и шкалой регулируемой величины (коэффициент масштабирования равен α).

Алгоритм в абсолютной форме (ПД-регулятор) используется, если нет интегральной составляющей (т. е. ti = 0). В этом случае сначала вычисляется значение выхода OUT, после чего вычисляется отклонение выхода OUTD.

Алгоритм в инкрементной форме (ПИД-регулятор) применяется, когда присутствует интегральная составляющая (т. е. ti > 0). В этом случае сначала вычисляется величина отклонения выхода OUTD, после чего вычисляется абсолютное значение выхода OUT по формуле

$$OUT_{(new)} = OUT_{(old)} + OUTD.$$

Данная форма алгоритма позволяет использовать выходной поток блока SERVO для управления астатическими процессами.

Алгоритм обладает дополнительными возможностями.

в случае, когда фактическое значение отличается от рассчитанного регулятором (разомкнутая система), в вычислениях за пределами блока лучше использовать реальное значение интегральной составляющей (при en_rcpy = 1). Если доступно

последнее значение, оно должно быть подано на вход RCPY, и значение параметра en_rcpy должно быть равно 1. Тогда при вычислении в блоке выражение

$$OUT_{(new)} = OUT_{(old)} + OUTD$$

принимает вид

$$OUT_{(new)} = RCPY + OUTD.$$

Алгоритм в инкрементной форме особенно полезен при каскадировании контуров или контуров с блоком автовыбора, поскольку в этом случае нет ограничения на значение выхода OUT.

Механизм регенерации с типом aw_type = 0 является основным. При этом возможна ситуация, когда после достижения какого-либо значения выходная величина внезапно выходит за пределы установленного интервала значений, даже если не изменился знак величины отклонения (например, при кратковременном возмущении регулируемой величины). При типе aw_type = 1 механизм регенерации позволяет избежать выхода за пределы интервала значений.

Алгоритм в инкрементной форме дает возможность уменьшить перерегулирование. В случае присутствия интегральной составляющей (ti<>0), параметр ovs_att позволяет ввести весовой коэффициент для пропорциональной составляющей. последняя вычисляется с помощью взвешенного отклонения:

$$PV – (1\text{-}ovs_att)\cdot SP.$$

Целью является получение определенного управляющего воздействия и динамичного отклика на возмущения без перерегулирования. Параметр ovs_att (overflow attenuation) может принимать следующие значения:

0 – вычисление пропорциональной составляющей по отклонению;

1 – вычисление пропорциональной составляющей по значению регулируемой величины.

Зона нечувствительности (dband) показана на рис. 3.12.

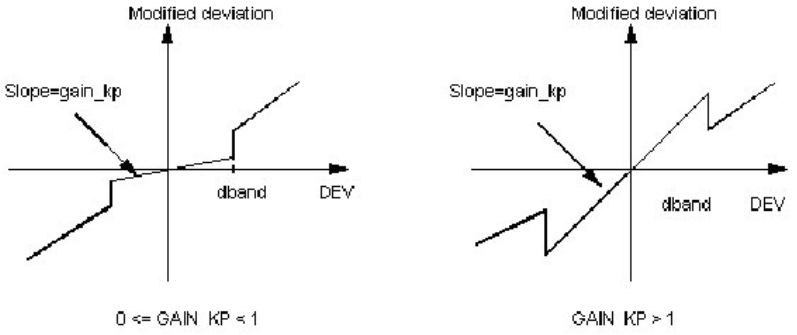


Рис.3.12 Зона нечувствительности

Внутри зоны нечувствительности параметр gain_kp может быть использован для изменения величины отклонения, а также для обращения ее в нуль, т. е. внутри зоны нечувствительности величина отклонения умножается на параметр gain_kp (см. рис. 3.12). Полученная таким образом величина отклонения используется для вычисления интегральной и пропорциональной составляющих.

Функция **Feed Forward** позволяет компенсировать возмущения, которые могут быть измерены, в момент их появления. В разомкнутой системе данная функция упреждает возмущения. Воздействие входа Feed Forward в регуляторе начинается с

момента определения режима direct/reverse и рассчитывается по формуле

$$out_ff = \frac{(FF - ff_\inf)\cdot(otff_\sup - otff_\inf)}{(ff_\sup - ff_\inf)} + otff_\inf$$

Функциональный блок PIDFF работает в трех режимах: автоматическом, ручном и режиме слежения (отладки). Эти режимы могут быть установлены с использованием входов MAN_AUTO и TR_S. Режим слежения (отладки) имеет более высокий приоритет.

В автоматическом режиме TR_S = 0; MAN_AUTO = 0.

В ручном режиме TR_S = 0; MAN_AUTO = 1.

В режиме слежения TR_S = 1; вход MAN_AUTO равен 0 или 1.

В автоматическом режиме выходы OUT и OUTD являются результатом вычислений, выполняемых блоком, причем значение OUT должно лежать в интервале [-out_min, out_max].

При ручном режиме работы блок не вычисляет значение OUT, позволяя оператору непосредственно изменять это значение. Однако это значение должно находиться в интервале [out_inf, out_sup] (вместо [out_min, out_max]).

В режиме слежения значение входа TR_I копируется на выход OUT, при этом значение выхода ограничено тем же интервалом, что и при ручном режиме: [out_inf, out_sup].

При использовании инкрементной формы алгоритма (ti<>0) переключение режимов работы осуществляется плавно (bumpless). Если применяется алгоритм в абсолютной форме (ti = 0), то протекание процесса переключения зависит от параметра bump. Если bump = 0, то параметр outbias пересчитывается таким образом, что значение выхода OUT вычисляется в соответствии с последним значением этого выхода, полученным в предыдущем режиме:

$$outbias = OUT_{(new)} - directiopn\cdot k_p\cdot dev_{(old)} - out_ff_{(old)}.$$

Если bump = 1, то переключение вызывает всплеск.

Функциональная схема PIDFF приведена на рис 3.13.

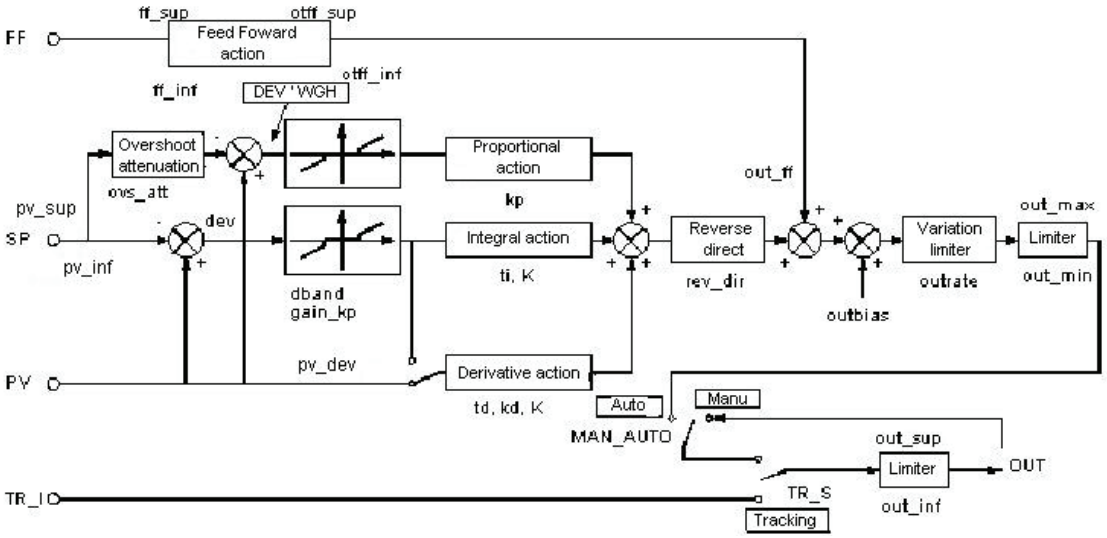


Рис.3.13. Функциональная схема ПИД-регулятора PIDFF

Основные промежуточные переменные и функции, используемые при вычислениях:

- TermP – пропорциональная составляющая (action);
- TermD – дифференциальная составляющая;
- TermI – интегральная составляющая;
- TermFF – значение переменной компенсации возмущений (Feed Forward);
- (new) – значение, полученное при текущем выполнении блока;
- (old) – значение, полученное на предыдущем цикле выполнения блока;
- K – коэффициент усиления при интегральной и дифференциальной составляющих. Коэффициент усиления зависит от структуры блока (смешанная или параллельная); если mix_par = 0 (т. е. структура – смешанная) и k_p<>0, то K = k_p; если mix_par=1 (т. е. структура – параллельная) или k_p = 0, то K = a = (out_sup – out_inf)/(pv_sup – pv_inf);
- VAR – переменная, используемая при вычислении дифференциальной составляющей. Значение этой переменной зависит от значения параметра pv_dev: если pv_dev = 0, то VAR = PV; если pv_dev = 1, то VAR = dev;
- Direction – направление. Если rev_dir = 1, то значение direction = +1 показывает, что положительное (PV–SP) (рассогласование) увеличивает значение выхода. Если rev_dir = 0, то значение direction = –1 показывает, что положительное (PV–SP) (рассогласование) уменьшает значение выхода;
- DEV_WGH = PV – (1 – ovs_att)*SP;
- dt – время, прошедшее с момента последнего выполнения блока;
- OUTc – предварительное значение выхода до лимитации (ограничения);
- D – $\Delta[x(t)] = x(t) - x(t-1)$;
- limiter – функция ограничения значения выхода блока.

Абсолютная форма алгоритма:

$$OUT = TermP + TermD + TermFF + outbias;$$

$$OUTD = OUTP_{(new)} - OUTP_{(old)};$$

$$OUT = limiter(OUT);$$

$$TermP = direction \cdot kp \cdot dev;$$

$$TermD = sens\frac{td \cdot TermD_{(old)} + K \cdot td \cdot kd \cdot \left(VAR_{(new)} - VAR_{(old)}\right)}{kd \cdot dt + td}$$

$$TermFF = \frac{\left(FF - ff_\inf\right) \cdot \left(otff_\sup - otff_\inf\right)}{\left(ff_\sup - ff_\inf\right)} + otff_\inf$$

Нормальная инкрементная форма алгоритма (при aw_type = 0):

$$OUT = TermP + TermI + TermD + TermFF;$$

$$OUT = OUT_{(old)} + OUTD_{(new)} \text{ (if en_rcpy = 0);}$$

$$OUT = RCPY + OUTD_{(new)} \text{ (if en_rcpy = 1);}$$

$$OUT = limiter(OUT);$$

$$TermP = direction \cdot kp \cdot [\Delta(DEV_WGH)];$$

$$Termi = direction \cdot k \cdot dt/ti \cdot dev;$$

$$TermD = \Delta\left[sens \frac{td \cdot TermD_{(old)} + K \cdot td \cdot kd \cdot \left(VAR_{(new)} - VAR_{(old)}\right)}{kd \cdot dt + td} \right]$$

$$TermFF = \Delta\left[\frac{\left(FF - ff_\inf\right) \cdot \left(otff_\sup - otff_\inf\right)}{\left(ff_\sup - ff_\inf\right)} + otff_\inf \right]$$

инкрементная форма алгоритма при использовании механизма регенерации (при aw_type = 1):

$OUTD = TermP + TermI + TermD + TermFF + TermAW;$

$OUTc = OUTc_{(old)} + OUTD_{(new)}$

независимо от значения en_rcpy;

$OUT = limiter(OUTc).$

Значения TermP, TermI, TermD, TermFF вычисляются так же, как в нормальной форме, а значения TermAW определяются так:

$TermAW = dt/ti\ [OUT_{(old)} - OUTc_{(old)}],$

если значение en_rcpy = 0;

$TermAW = dt/ti\ [RCPY - OUTc_{(old)}],$

если значение en_rcpy = 1.

При работе регулятора в чистом интегральном режиме (при kp = 0) нормальная инкрементная форма (при aw_type = 0):

$$OUTD = Termi + TermFF;$$

$$OUT = OUT_{(old)} + OUTD_{(new)} \text{ (if en_rcpy = 0);}$$

$$OUT = RCPY + OUTD_{(new)} \text{ (if en_rcpy = 1);}$$

$$OUT = limiter(OUT);$$

$$Termi = direction \cdot \alpha \cdot dt/ti \cdot dev;$$

$$TermFF = \Delta\left[\frac{\left(FF - ff_\inf\right) \cdot \left(otff_\sup - otff_\inf\right)}{\left(ff_\sup - ff_\inf\right)} + otff_\inf \right]$$

Инкрементная форма алгоритма в интегральном режиме (при kp = 0) при использовании механизма регенерации (при aw_type = 1):

$OUTD = TermI + TermFF + TermAW;$

$OUTc = OUTc_{(old)} + OUTD_{(new)}$

независимо от значения en_rcpy;

$OUT = limiter(OUTc).$

Значения TermI, TermFF вычисляются так же, как в нормальной форме, а значения TermAW определяются так:

$TermAW = dt/ti\ [OUT_{(old)} - OUTc_{(old)}],$

если значение en_rcpy = 0;

TermAW = dt/ti [RCPY – $OUTc_{(old)}$],

если значение en_rcpy = 1.

3.3. АДАПТАЦИЯ И АВТОМАТИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРА

Настройка параметров блоков PI_B и PIDFF существенно облегчается блоком автонастройки AUTOTUNE. Этот блок можно легко установить со стороны входов блока Controller. При этом автонастройка начинается в любой момент без применения специальных программных средств.

Функциональный блок AUTOTUNE (рис. 3.14) предназначен для автоматической настройки различных ПИД-регуляторов (PIDFF, PI_B).

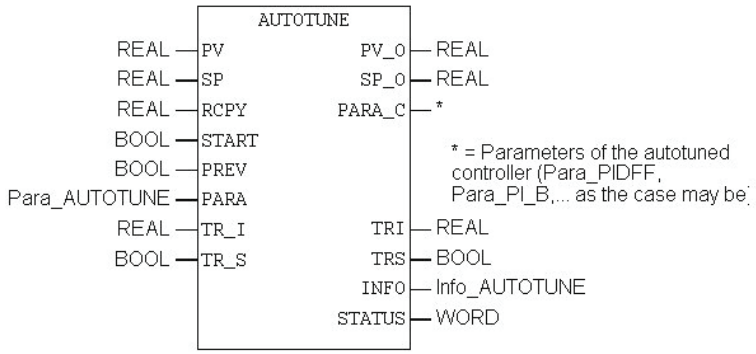


Рис.3.14. Функциональный блок AUTOTUNE

В алгоритме реализованы эвристические правила метода Зиглера–Никольса. Сначала на интервале времени, равном 2,5 Тпп, где Тпп – время переходного процесса для разомкнутого контура, выполняется анализ процесса для его идентификации в первом приближении при данной постоянной времени. Далее с помощью этой модели вычисляется ряд параметров настройки на основе эвристических правил и экспериментальных данных.

Предварительно выбранный диапазон параметров затем уточняется либо по критерию оптимального быстродействия, либо по критерию устойчивости.

Алгоритм применим к следующим типам процессов:

2. процессы в системах с одним входом и одним выходом;
3. самовыравнивающиеся или астатические (с интегратором);
4. асимметрические процессы в пределах допуска ПИД-алгоритма;
5. в системах с ШИМ-выходным сигналом регулирования.

Основные выполняемые функции: вычисление параметров настройки блоков PIDFF или PI_B; диагностика; настройка; выбор параметров; оценка качества динамики настройки синтезируемой системы; восстановление прежней настройки.

Используются два варианта автонастройки: горячая автонастройка и холодная автонастройка.

Первая фаза автонастройки одинакова для обоих вариантов: это анализ шума и устойчивости процесса на интервале 0,5 tmax. В это время выходные сигналы остаются неизменными. Последующие фазы зависят от выбора варианта автонастройки.

Холодная автонастройка осуществляется в случае, если процесс отличается от уставки более чем на 40 %, а текущее значение процесса не превышает 30 %. В этом случае на выходе TRI функционального блока появляются два одинаковых ступенчатых воздействия (рис. 3.15).

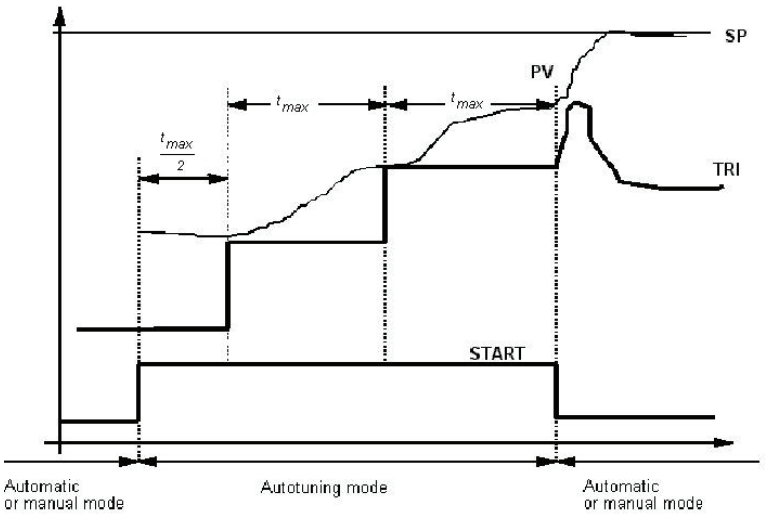


Рис.3.15.Холодная автонастройка

Каждая ступенька действует на интервале tmax. После окончания автонастройки восстанавливается предыдущий режим работы контура.

Если нет условий для холодной автонастройки, то выполняется горячая автонастройка: ступенчатые воздействия инвертируются, т. е. имеют противоположные направления (рис. 3.16).

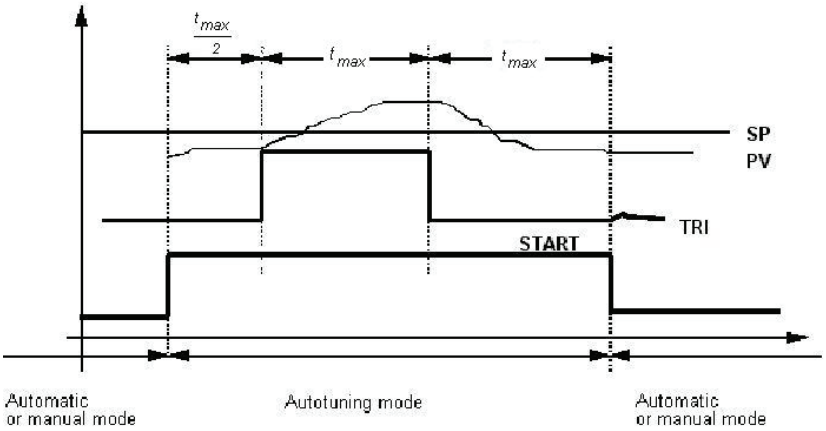


Рис.3.16. Горячая автонастройка

Продолжительность каждой ступеньки соответствует tmax. После окончания автонастройки восстанавливается прежний режим работы контура.

После каждой серии из двух ступенек вычисляются параметры настройки регулятора. Уравнения, на основании которых рассчитываются эти параметры для регулятора, составляются с учетом коэффициента усиления и соотношения между временем переходного процесса и временем запаздывания.

В терминах теории робастного управления алгоритм должен поддерживать изменения коэффициента усиления и постоянной времени с коэффициентом, равным 2,

без потери устойчивости. Асимметричные процессы поддерживаются (можно анализировать) в той степени, в какой они соответствуют этому ограничению. В противном случае фиксируется ошибка и выдается диагностическое сообщение.

Процедура идентификации процесса разбивается на три этапа.

Этап 1. Анализ шума и устойчивости.

Этап 2. Первичный анализ переходной характеристики для синтеза модели в первом приближении (на основе первичной оценки формируется фильтр, который используется на следующем этапе).

Этап 3. Вторичный анализ отклика (на вторую ступеньку). (Он позволяет уточнить результат обработки данных.)

В конечном счете сформируется математическая модель процесса. Если результаты двух приближений сильно отличаются один от другого, то они отбрасываются как ложные и автонастройка считается неудачной.

В процессе автонастройки на выходе TRI дважды формируется ступенчатое воздействие. Ступенька определяется двумя параметрами: длительностью (tmax) и амплитудой (step_ampl).

Диапазон значений этих двух параметров выбирается следующим образом: tmax > 4c и step_ampl больше, чем 1% от шкалы изменения выходного сигнала (out_inf, out_sup). При параметризации также подтверждается, что значение TRI не выходит за пределы шкалы выходного сигнала. Эта верификация осуществляется в момент начала процедуры автонастройки.

В качестве примера в табл. 3.8 представлены значения параметров некоторых типичных условий настройки.

Таблица 3.8

Объект (тип среды)	tmax, c	step_ampl, %
Скоростной напор жидкости или давление	5-30	10-20
Давление газа	60-300	10-20
Скачок (тока)	120-600	20
Температура пара или его давление	600-3600	30-50
Составной	600-3600	30-50

Настройку регулятора можно изменять в зависимости от значения индекса автонастройки perf. Параметр perf принимает значения от 0 до 1, что позволяет для устойчивости ограничиться значениями, близкими к perf = 0, или дает возможность получить более динамичную настройку, устремляя этот параметр к значению perf = 1 (тем самым оптимизируется время переходного процесса в процессе загрузки изменений).

Для подключения функции наблюдения за процессом автонастройки необходимо присвоить входному биту START значение 1. По окончании процесса автонастройки следует восстановить нулевое значение бита программы пользователя. В ходе выполнения автонастройки можно прекратить наблюдение путем восстановления нулевого значения бита START. В этом случае параметры в стеке PARA_C примут предыдущее значение и будут заблокированы. В примере, приведенном на рис. 3.17, бит START восстанавливается автоматически командой из программы в конце процедуры автонастройки.

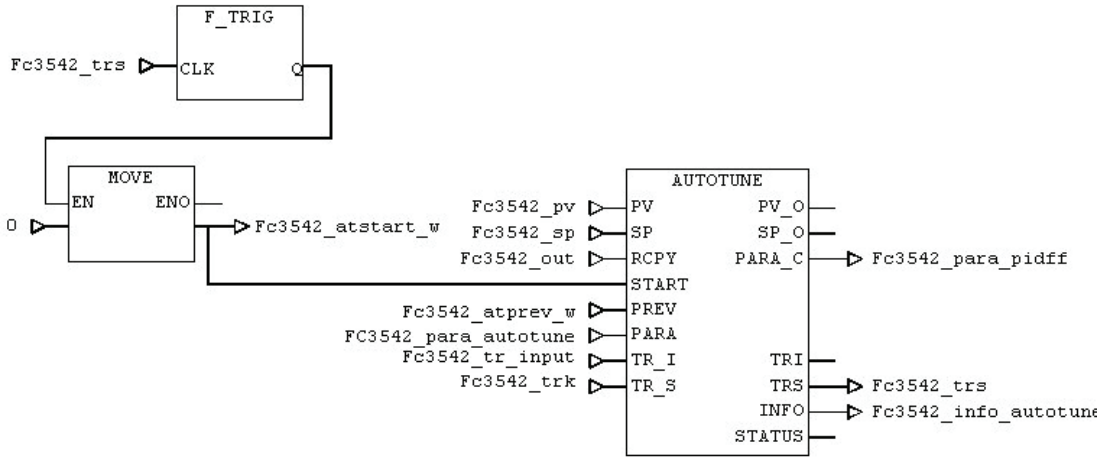


Рис.3.17. Автоматическое восстановление бита START

Любая модификация значения бита PREV позволяет выполнить перестановку между текущими и предшествующими параметрами при условии, что процедура автонастройки не действует (таким образом, две последовательные модификации этого бита приводят к восстановлению исходной настройки).

В случае применения блока PIDFF параметры структурированной переменной Info_AUTOTUNE имеют вид

p1_prev = KP;

p2_prev = TI;

p3_prev = TD.

В случае применения блока PI_B

p1_prev = KP;

p2_prev = TI.

Результаты **диагностики** автонастройки хранятся в двойном слове diag вплоть до начала новой процедуры автонастройки.

На рис. 3.18 приведен пример подключения блока AUTOTUNE к блоку PIDFF.

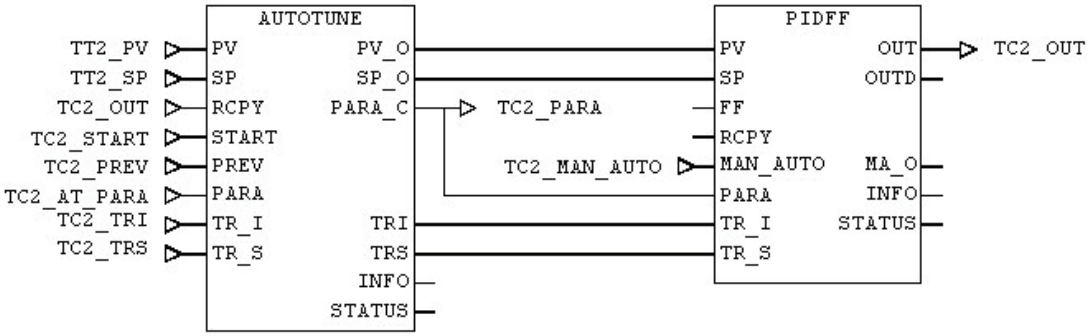


Рис.3.18. Схема подключения блока автонастройки к регулятору

Между блоком AUTOTUNE и регулятором происходит обмен параметрами. Параметры контроллера передаются по каналу связи между выходом PARA_C блока AUTOTUNE и входом PARA регулятора. Выход PARA_C имеет тип ANY, так что блок AUTOTUNE можно подключать к различным типам регуляторов (PIDFF или PI_B).

Кроме того, следует ввести разделяемые переменные PV, SP, TR_I и TR_S. Эти переменные являются входами блока AUTOTUNE, которые без изменения передаются на соответствующие его выходы и далее попадают на входы регулятора.

В ходе автонастройки выход TRS принимает значение 1, и команда появляется на выходе TRI. Эти выходы предназначены для подключения к входам TR_I и TR_S тех функциональных блоков, которые расположены вслед за блоком AUTOTUNE для перевода их в режим трассировки (PIDFF, PI_B, MS, …).

В качестве примера рассмотрим базовый вариант автонастройки одного регулятора типа PI_B или PIDFF. Для осуществления автонастройки необходимо иметь информацию о шкале параметров регулятора (структура PARA_C, т. е. pv_inf, pv_sup, out_inf, out_sup), а также соответствующие параметры типа структуры регулятора, определяемые значением бита mix_par. В результате преобразований функциональный блок вырабатывает ПИД-параметры (KP, TI, TD). Направление работы регулятора (rev_dir) проверяется тестом автонастройки и сравнивается со знаком коэффициента усиления соответствующей модели. В случае противоречия в параметре diag появляется сигнал ошибки.

Если в контуре имеется блок ручного управления MS, то схема подключения может быть такой, как показано на рис. 3.19.

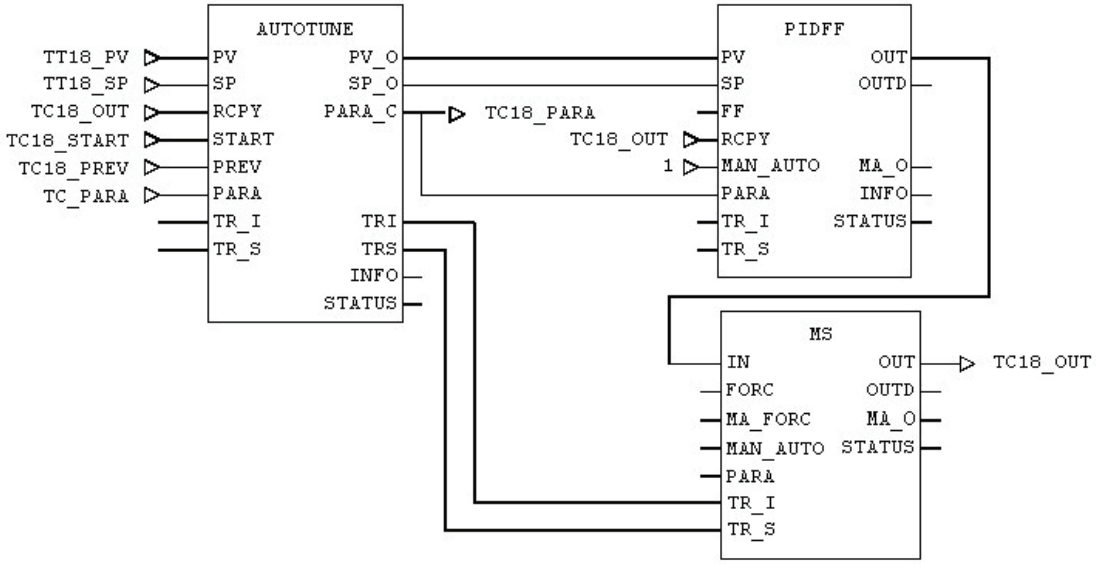


Рис.3.19. Схема подключения блока ручного управления

В этом случае в начале автонастройки блоком AUTOTUNE проводится переключение блока MS в режим трассировки, что создает возможность прямого управления выходом контура. Использование входов RCPY в блоках AUTOTUNE и PIDFF позволяет выполнять безударный рестарт контура.

В табл. 3.9 приведены различные режимы контура автонастройки, а также указан их относительный приоритет.

Таблица 3.9

Режим работы	TR_S	START
Трассировка	1	0 или 1
Автонастройка	0	1

В конце цикла автонастройки выход TRS восстанавливается, что приводит к восстановлению прежнего режима работы (ручного или автоматического). При возникновении ошибки в процессе автонастройки переменная TRI принимает то значение, которое было до начала автонастройки, а также восстанавливается изначальный режим работы контура.

За процессом автонастройки удобно следить с помощью операторского экрана (рис.3.20).

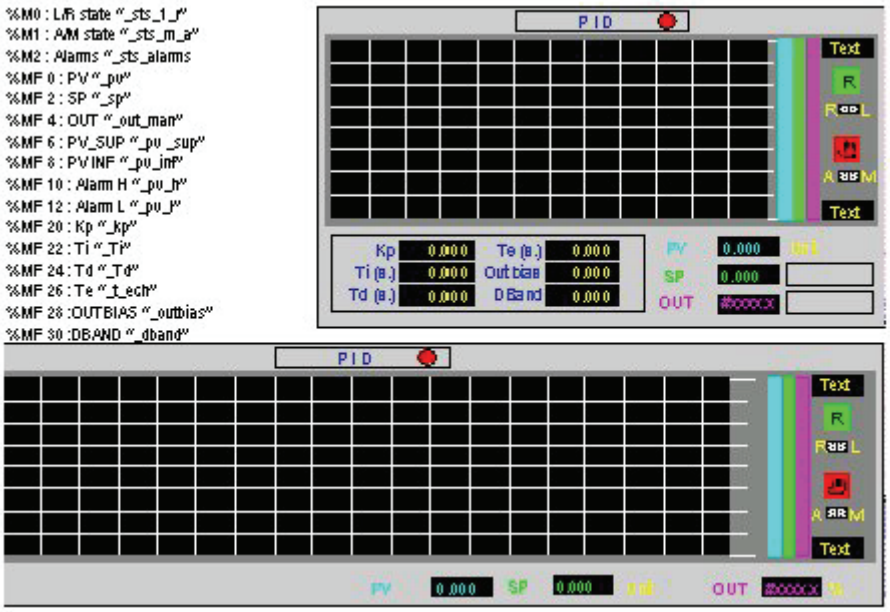


Рис.3.20. Стандартный экран для настройки ПИД-регулятора

Автонастройка может быть не реализована по ряду причин. Отказ может случиться в процессе выполнения процедуры, либо отказ может иметь место, если, например, выбран ряд параметров в результате ошибочной операции.

Каждый бит слова состояния diag может сигнализировать о типе ошибки. Это же слово позволяет идентифицировать текущий режим работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В системах автоматического управления, построенных на базе ПЛК Schneider Electric, имеется возможность:

а) безболезненного и практически любого изменения алгоритмов и структуры управления непосредственно в процессе пуска и эксплуатации системы на действующем объекте;

б) включения в состав системы специального математического обеспечения программы идентификации и оптимизации с организацией диалогового режима с наладочным персоналом.

Автоматизация процесса настройки позволяет сохранить оптимальную настройку системы в течение всего времени работы объекта и способствует поиску путей совершенствования заложенных в проект решений, модернизации систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деменков Н.П. Языки программирования промышленных контроллеров / Под ред. К.А. Пупкова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. -172 с.

2. Деменков Н.П. SCADA-системы как инструмент проектирования АСУ ТП: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. -328 с.

3. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. -200 с.

4. Средства автоматизации. Электронная библиотека документации (версия 5.62). Schneider Electric, 2005.

5. Деменков Н.П. Программные средства оптимизации настройки систем управления: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. -244 с.

Schneider Electric в странах СНГ

Азербайджан
Баку
AZ 1008, ул. Гарабах, 22
Тел.: (99412) 496 93 39
Факс: (99412) 496 22 97

Беларусь
Минск
220030, ул. Белорусская, 15, офис 9
Тел.: (37517) 226 06 74, 227 60 34
227 60 72

Казахстан
Алматы
050050, ул. Табачнозаводская, 20
Швейцарский Центр
Тел.: (727) 244 15 05 (многоканальный)
Факс: (727) 244 15 06, 244 15 07

Астана
ул. Бейбитшилик, 18
Бизнес-центр «Бейбитшилик 2002», офис 402
Тел.: (7172) 91 06 69
Факс: (7172) 91 06 70

Атырау
060002, ул. Абая, 2-А
Бизнес-центр «Сутас - С», офис 407
Тел.: (7122) 32 31 91, 32 66 70
Факс: (7122) 32 37 54

Россия
Волгоград
400001, ул. Профсоюзная, 15/1, офис 12
Тел.: (8442) 93 08 41

Воронеж
394026, пр-т Труда, 65
Тел.: (4732) 39 06 00
Тел./факс: (4732) 39 06 01

Екатеринбург
620219, ул. Первомайская, 104, офисы 311, 313
Тел.: (343) 217 63 37, 217 63 38
Факс: (343) 349 40 27

Иркутск
664047, ул. Советская, 3 Б, офис 312
Тел./факс: (3952) 29 00 07

Казань
420107, ул. Спартаковская, 6, этаж 7
Тел.: (843) 526 55 84 / 85 / 86 / 87 / 88

Калининград
236040, Гвардейский пр., 15
Тел.: (4012) 53 59 53
Факс: (4012) 57 60 79

Краснодар
350020, ул. Коммунаров, 268, офисы 316, 314
Тел./факс: (861) 210 06 38, 210 06 02

Красноярск
660021, ул. Горького, 3 А, офис 302
Тел.: (3912) 56 80 95
Факс: (3912) 56 80 96

Москва
129281, ул. Енисейская, 37
Тел.: (495) 797 40 00
Факс: (495) 797 40 02

Нижний Новгород
603000, пер. Холодный, 10 А, офис 1.5
Тел.: (831) 278 97 25
Тел./факс: (831) 278 97 26

Новосибирск
630005, Красный пр-т, 86, офис 501
Тел.: (383) 358 54 21, 227 62 54
Тел./факс: (383) 227 62 53

Пермь
614010, Комсомольский пр-т, 98, офис 11
Тел./факс: (343) 290 26 11 / 13 / 15

Самара
443096, ул. Коммунистическая, 27
Тел./факс: (846) 266 50 08, 266 41 41, 266 41 11

Санкт-Петербург
198103, ул. Циолковского, 9, корпус 2 А
Тел.: (812) 320 64 64
Факс: (812) 320 64 63

Уфа
450064, ул. Мира, 14, офисы 518, 520
Тел.: (347) 279 98 29
Факс: (347) 279 98 30

Хабаровск
680011, ул. Металлистов, 10, офис 4
Тел.: (4212) 78 33 37
Факс: (4212) 78 33 38

Туркменистан
Ашгабат
744017, Мир 2/1, ул. Ю. Эмре, «Э.М.Б.Ц.»
Тел.: (99312) 45 49 40
Факс: (99312) 45 49 56

Узбекистан
Ташкент
100000, ул. Пушкина, 75
Тел.: (99871) 140 11 33
Факс: (99871) 140 11 99

Украина
Днепропетровск
49000, ул. Глинки, 17, 4 этаж
Тел.: (380567) 90 08 88
Факс: (380567) 90 09 99

Донецк
83023, ул. Лабутенко, 8
Тел./факс: (38062) 345 10 85, 345 10 86

Киев
04070, ул. Набережно-Крещатицкая, 10 А
Корпус Б
Тел.: (38044) 490 62 10
Факс: (38044) 490 62 11

Львов
79015, ул. Тургенева, 72, к. 1
Тел./факс: (032) 298 85 85

Николаев
54030, ул. Никольская, 25
Бизнес-центр «Александровский», офис 5
Тел./факс: (380512) 48 95 98

Одесса
65079, ул. Куликово поле, 1, офис 213
Тел./факс: (38048) 728 65 55

Симферополь
95013, ул. Севастопольская, 43/2, офис 11
Тел./факс: (380652) 44 38 26

Харьков
61070, ул. Ак. Проскуры, 1
Бизнес-центр «Telesens», офис 569
Тел.: (380577) 19 07 49
Факс: (380577) 19 07 79

ЦЕНТР ПОДДЕРЖКИ КЛИЕНТОВ

Тел.: 8 (800) 200 64 46 (многоканальный)
(495) 797 32 32
Факс: (495) 797 40 02
ru.csc@ru.schneider-electric.com
www.schneider-electric.ru