

USWO — новый способ формирования управления для замкнутых систем автоматического регулирования

Владимир Бажанов

Разработка затрагивает многолетнюю традицию, сложившуюся в мировой практике массового производства универсальных регуляторов для замкнутых систем автоматического управления.

Замена в регуляторах классического ПИД-алгоритма на новый алгоритм USWO

не только не сужает область их применения,

но и обеспечивает значительное повышение качества работы систем промышленной автоматики.

Простота настройки регуляторов с USWO-алгоритмом делает их более удобными в эксплуатации.

Для управления параметрами технологических процессов и установок наиболее широко применяются замкнутые системы автоматического регулирования. Их типовая структура представлена на рис. 1.

Благодаря этому важнейшему достоинству стал возможен серийный выпуск регуляторов для общепромышленного применения, а также сложился единый

весьма значительной и зависит от свойств управляемого объекта. Этот факт хорошо известен разработчикам типовых регуляторов. Именно поэтому их усилиями созданы модификации ПИД-алгоритма — PID(A) и PID(B), а также разработаны методы автоадаптации настроек ПИД-регуляторов. Налицо естественное стремление улучшить работу ПИД-регуляторов, сохранив их главное достоинство — универсальность.

Но возможен и другой подход к решению проблемы, состоящий в том, чтобы исследовать свойства оптимальных управлений динамическими объектами различного типа, выявить общие закономерности и, объединив их, синтезировать новый способ формирования управления для замкнутых систем, обладающий свойством универсальности.

Такой подход был реализован. Новый способ формирования управления получил условное название USWO. Подобно ПИД-способу, он формирует управляющее воздействие на основе информации о текущем состоянии объекта управления. По своему содержанию ПИД и USWO-способы принципиально отличаются друг от друга. В частности, первый является линейным, в то время как второй устанавливает знак и величину



Условные обозначения:

- X(t) — регулируемая величина;
- Q(t) — возмущающее воздействие;
- Xs — задание регулятору;
- U(t) — команды регулятора;
- Y(t) — управляющее воздействие.

Рис. 1. Типовая структура замкнутой системы автоматического регулирования

В подавляющем большинстве таких систем применяются регуляторы, реализующие классический пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон управления. Способность ПИД-регуляторов управлять объектами, отличающимися по физической природе, свойствам и назначению, свидетельствует об их универсальности.

подход к подготовке специалистов по технологической автоматике для всех отраслей производства.

Универсальность типовых регуляторов обусловлена ни чем иным, как самим ПИД-способом формирования управляющего воздействия. За нее, как за любое другое достоинство, приходится чем-то платить. Платой за универсальность ПИД-регуляторов является потеря качества управления. Ее размеры выясняются путем прямого сравнения качества ПИД-управления с реально достижимым качеством оптимального управления. Исследования показывают, что даже при самой квалифицированной настройке ПИД-регуляторов плата за их универсальность оказывается

управляющего воздействия на основе условия переключения, представляющего собой нелинейное соотношение между компонентами вектора состояния объекта управления. Основные принципы USWO-способа управления изложены во врезке к данной статье, пока же все внимание будет уделено его анализу, с точки зрения практической эффективности.

Прежде всего важен ответ на вопрос: обладает ли USWO-способ свойством универсальности? Если да, тогда второй и основной вопрос: оказалась ли «плата» за универсальность у USWO-способа ниже, чем у классического ПИД-закона и в достаточной ли степени, чтобы представлять интерес для практики?

Чтобы получить ответы на эти вопросы, была создана компьютерная программа, моделирующая процессы в замкнутых системах автоматического регулирования. В качестве объектов управления в программе задан набор динамических звеньев, описываемых передаточными функциями следующего вида:

$$W(p) = \frac{k \cdot \exp(-p \cdot t_z)}{p} \quad (1)$$

$$W(p) = \frac{k \cdot \exp(-p \cdot t_z)}{(Tp + 1)} \quad (2)$$

$$W(p) = \frac{k \cdot \exp(-p \cdot t_z)}{p^2} \quad (3)$$

$$W(p) = \frac{k \cdot \exp(-p \cdot t_z)}{p \cdot (T \cdot p + 1)} \quad (4)$$

$$W(p) = \frac{k \cdot \exp(-p \cdot t_z)}{(Tp + 1)(R \cdot p + 1)} \quad (5)$$

Здесь k — коэффициент передачи объектов управления, T и R — постоянные времени, t_z — время транспортного запаздывания, — представляют собой вводимые в программу величины.

Указанный набор динамических звеньев (1)-(5) достаточно представительен, т. к. может удовлетворительно аппроксимировать поведение широкого класса реальных технологических установок и агрегатов.

Поскольку на качество работы замкнутых систем регулирования значительное влияние оказывают исполнительные устройства (ИУ), в программу были введены элементы, имитирующие действие двух типов исполнительных устройств, получивших наибольшее распространение на практике:

а) малоинерционные исполнительные устройства (пропорциональное звено) с ограниченным рабочим диапазоном;

б) исполнительные устройства на базе реверсивных приводов с установленной скоростью перемещения и ограниченным рабочим диапазоном.

С целью сравнения, наряду с новым USWO-алгоритмом, в программу включен традиционный ПИД-алгоритм управления.

В процессе исследования конфигурировались замкнутые системы с различным сочетанием «объект — регулятор — исполнительное устройство». Качество работы замкнутых систем оценивалось по их реакции на действие внешних возмущений и на изменение задания регулятором.

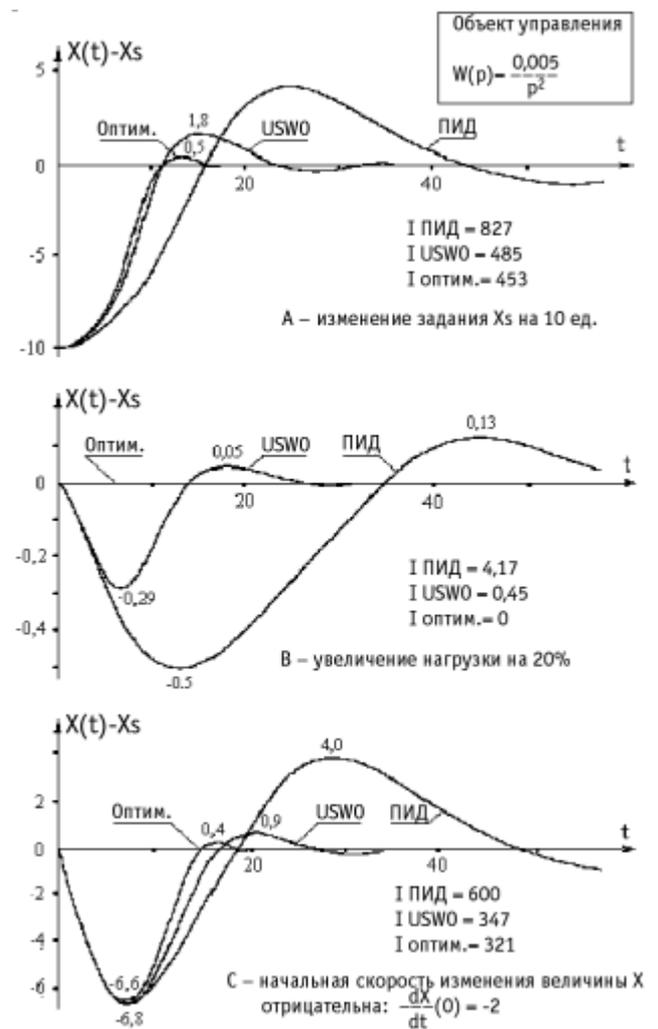
Исследования показали уверенную способность USWO-регулятора справляться с управлением объектами, описываемыми всеми звеньями (1)-(5). Это подтверждает, что новый USWO-способ управления обеспечивает регуляторам свойство универсальности. А чтобы оценить, в какой степени, нужно полностью выявить все классы объектов, на которых могут использоваться USWO-регуляторы. Характер процедуры синтеза USWO-способа управления дает основание ожидать, что по степени универсальности он не будет уступать традиционному ПИД-способу. Пока можно только констатировать, что не удалось обнаружить ни одного объекта, пригодного для ПИД-регулирования, к которому был бы неприменим USWO-способ управления.

Насколько оказалась решенной вторая часть проблемы — снизить плату за универсальность — показывает сравнение качества работы замкнутых систем с ПИД и USWO-регуляторами. Исследования проводились для каждого типа объектов управления (1)-(5). Определялись параметры настройки ПИД и USWO-регуляторов, при которых обеспечивалось наиболее высокое качество управления каждым конкретным объектом

по выбранному критерию. Компьютерная программа позволяла проводить сравнение систем при совершенно одинаковых исходных условиях.

Результаты оказались однозначными. В равных условиях регуляторы с USWO-способом формирования управления обеспечивали более высокое качество работы замкнутых систем автоматики. При этом разница по основным показателям качества регулирования в большинстве опытов оказалась значительной. На рис. 2 представлен один из характерных результатов сравнения. В примере использован объект управления типа (3), описываемый дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = 0,05 \cdot [Y(t) - H] \quad (6)$$



Условные обозначения:

ИУ — пропорциональное звено с ограниченным рабочим диапазоном 0-100 %; шаг дискретизации по времени — 0,5. Настройки регуляторов: ПИД - $K_p = 20$, $T_i = 8$, $T_d = 12,5$, USWO — $K_1 = 120$, $K_2 = 0$, $K_3 = 9$.

Рис. 2. Переходные процессы для объектов управления типа (3)

Здесь N — нагрузка на объект, оцениваемая в единицах входного воздействия $Y(t)$. Исполнительное устройство выбрано типа a — пропорциональное звено

$$Y(t) = U(t), \quad (7)$$

с ограниченным рабочим диапазоном

$$0 < Y(t) < 100 (\%) \quad (8)$$

Рассматриваемый пример интересен тем, что для случая (6), (7), (8) известно и достаточно просто рассчитывается точное управление, оптимальное по интегральному квадратичному критерию

$$I = \int_0^{t_p} [X(t) - X_s]^2 dt \quad (9)$$

Здесь t_p — время регулирования, X_s — задание регулятору.

Благодаря этому имеется возможность не только сравнить по качеству работы ПИД и USWO-регуляторы между собой, но также и сопоставить их действие с результатом оптимального

(по критерию 9) управления. Рис. 2А показывает переходные процессы при изменении уставки задания X_s на 10 единиц. Рис. 2В отображает работу замкнутых систем при увеличении нагрузки на объект на 20%. Следует отметить, что строго оптимальное управление в этом случае является «особым», сохраняющим регулируемую величину на заданном уровне (нулевое рассогласование $X(t) - X_s = 0$). Процессы на рис. 2С — это реакция систем управления на внешние возмущения, суммарное действие которых проявилось в том, что начальное значение производной регулируемой величины оказалось отрицательным

$$\frac{dX}{dt}(0) = C_0 = -2 \quad (10)$$

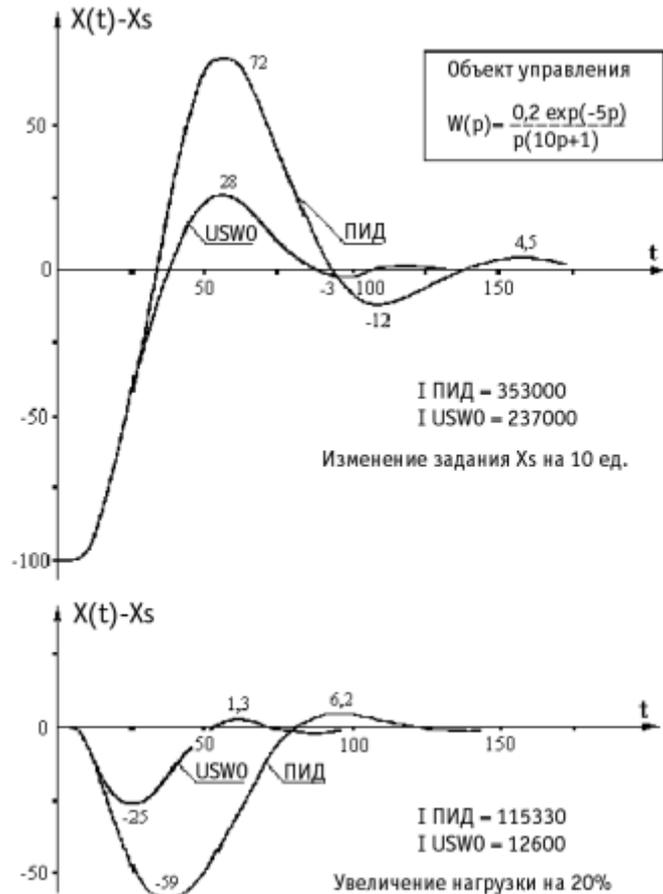
Значения параметров настройки ПИД и USWO-регуляторов в представленном на рис. 2 примере (как и во всех последующих примерах) определялись градиентным методом поиска оптимума по выбранному критерию качества или совокупности критериев. USWO-способ формирования управления преду-

сматривает три параметра настройки — K_1, K_2, K_3 . Численные значения этих параметров, подобно параметрам K_p, T_i, T_d у ПИД-регуляторов, зависят от свойств объекта управления. Физический смысл параметров настройки ПИД и USWO-регуляторов различен.

На рис. 3 и 4 приведены примеры, сопоставляющие качество работы ПИД и USWO-регуляторов при управлении объектами других типов с различными исполнительными устройствами. Объекты имеют транспортное запаздывание, что делает их «более трудными» для управления.

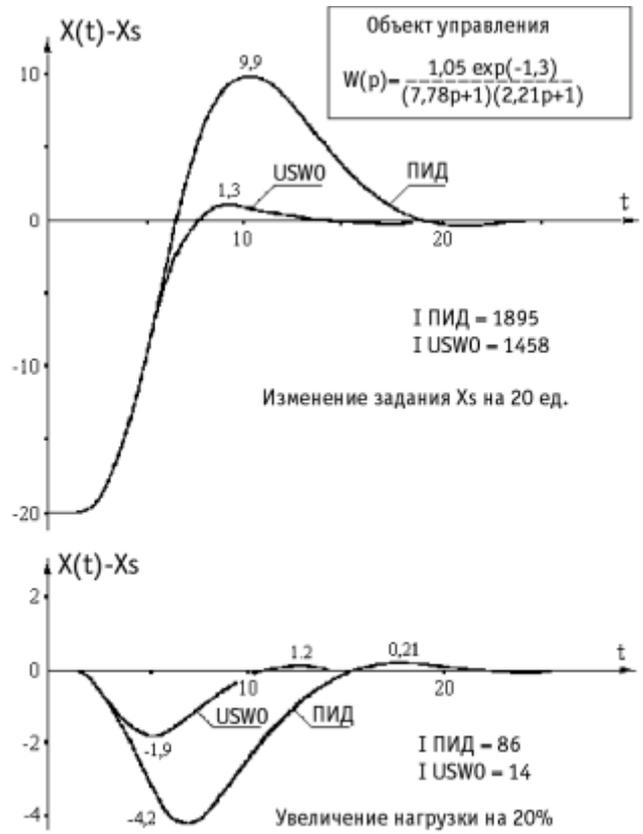
Представленные на рис. 2, 3 и 4 переходные процессы в замкнутых системах отражают наиболее характерное соотношение между качеством управления ПИД и USWO-регуляторов, которое наблюдалось в большинстве проведенных опытов.

Анализ USWO-способа формирования управления показал, что алгоритм программной реализации способа хорошо приспособлен для включения в него процедур, образующих предиктор Смита, позволяющий улучшать качество управления объектами с транспорт-



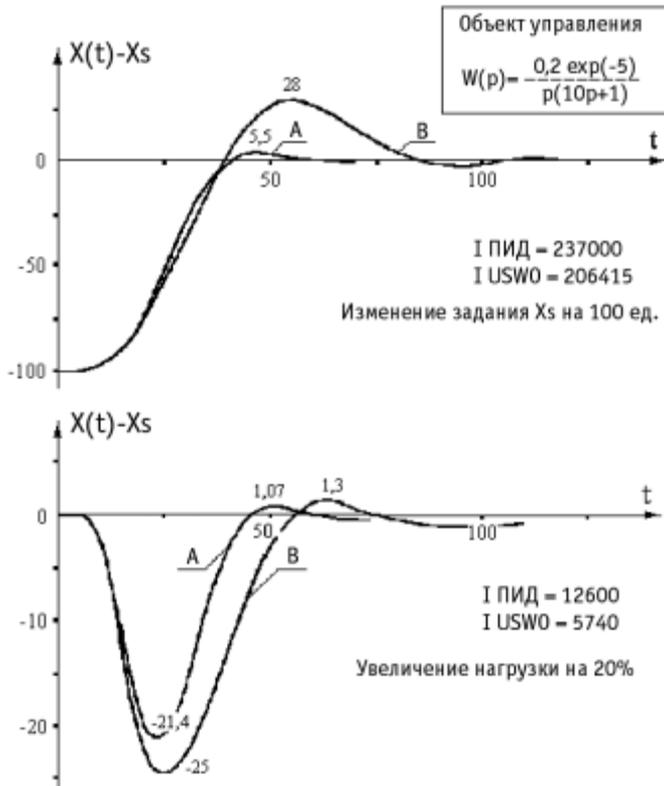
Условные обозначения:
 ИУ — реверсивный привод с ограниченным рабочим диапазоном 0-100%, со временем перемещения на 100%, равным 30 ед.
 Настройки регуляторов: ПИД — $K_p = 0,35, T_i = 44, T_d = 3,$
 USWO — $K_1 = 30, K_2 = 0, K_3 = 0,3.$

Рис. 3. Переходные процессы для объектов управления типа (4)



Условные обозначения:
 ИУ — пропорциональное звено с ограниченным рабочим диапазоном 0-100%.
 Настройки регуляторов: ПИД — $K_p = 4, T_i = 5,35, T_d = 1,5,$
 USWO — $K_1 = 5, K_2 = 0, K_3 = 3.$

Рис. 4. Переходные процессы для объектов управления типа (5)



Условные обозначения:

ИУ — реверсивный привод с ограниченным рабочим диапазоном 0 -100%, со временем перемещения на 100%, равным 30 ед.

Настройки регуляторов: «А» — с предиктором Смита — $K_1 = 230$, $K_2 = 1$, $K_3 = 1$, «В» — без предиктора — $K_1 = 30$, $K_2 = 0$, $K_3 = 0,25$

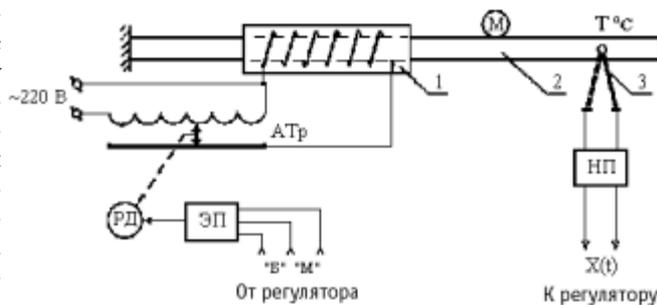
Рис. 5. Влияние предиктора Смита на работу USWO-регулятора

ным запаздыванием. Результаты испытаний, приведенные на рис. 5, дают представление об эффекте, который достигается при использовании предиктора Смита в составе USWO-регулятора.

Многие реальные объекты управления с течением времени, или в зависимости от режима работы меняют в некоторых пределах свои характеристики. Это неизбежно отражается на качестве управления. Поэтому практический интерес представляет анализ чувствительности работы замкнутых систем к вариациям параметров объектов. Исследования, проведенные с помощью моделирующей программы, показали, что в большинстве случаев системы с USWO-регулятором обладают более стабильным качеством управления по сравнению с системами, где применяются ПИД-регуляторы.

В настоящее время проведено первое лабораторное опробование USWO-регулятора на реальном физическом объекте. Конструкция экспериментальной

установки представлена на рис. 6. Для измерения температуры (регулируемой величины) использована стандартная термопара совместно с нормирующим преобразователем. Реверсивный электродвигатель (исполнительное устройство) служит для перемещения движка автотрансформатора и изменения напряжения на нагревательной спирали теплового объекта. Экспериментальный USWO-регулятор был реализован с помощью персональ-



Условные обозначения:

1 — электронагреватель;

2 — медный стержень;

3 — термопара;

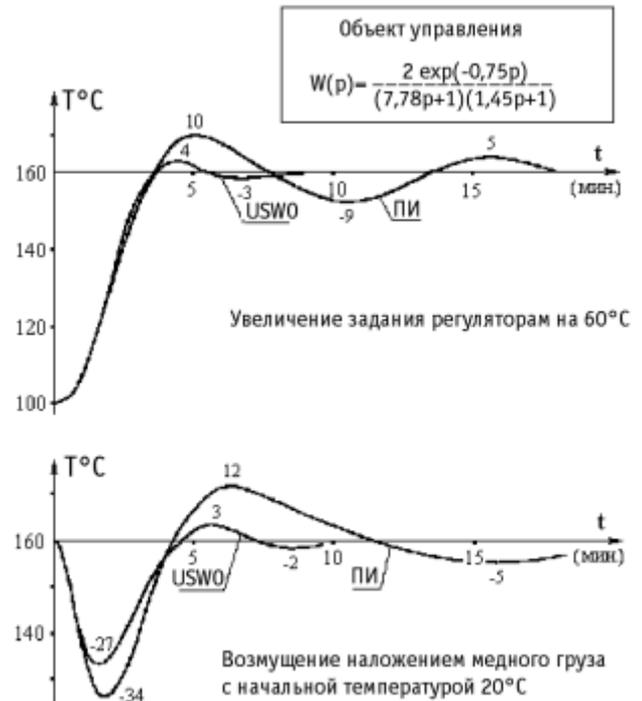
НП — нормирующий преобразователь;

ЭП — электромагнитный пускатель;

РД — реверсивный двигатель;

АТр — автотрансформатор.

Рис. 6. Установка для испытания регуляторов



Настройки регуляторов: РП-4 — $K_p = 45$ (%/мА), $T_i = 220$ с, USWO — $K_1 = 7$, $K_2 = 0$, $K_3 = 1$

Рис. 7. Переходные процессы в экспериментальной нагревательной установке

ного компьютера, дополненного блоком ввода-вывода сигналов, подключаемых к компьютеру через принтерный порт. Программа USWO-способа формирования управления составлена на языке BASIC. Опыт подтвердил работоспособность компьютерной модели USWO-регулятора. Для сравнения к экспериментальной установке подключался серийный релейно-импульсный регулятор типа РП-4 с ПИ-алгоритмом управления. На рис. 7 показаны переходные процессы в замкнутых системах при изменении задания регуляторам, а также при нанесении на объект возмущающего воздействия путем установки на нагретый стержень 2 металлической массы M с начальной температурой 20 градусов по Цельсию. Масса устанавливалась на строго определенном расстоянии от точки измерения температуры стержня. Опыт интересен еще и в том смысле, что размещение дополнительной массы M изменяет динамические свойства объекта управления.

Современные серийно выпускаемые промышленные регуляторы представляют собой компактные микропроцессорные устройства. Традиционный ПИД-алгоритм управления устанавливается в их постоянной памяти в виде программного блока. Достаточно заменить его на программу USWO-алгоритма, чтобы получить новый регулятор.

При этом конструктив регулятора, его входные и выходные цепи, блок питания и другие узлы можно сохранить без изменений.

Применение стандартных сигналов внешней коммутации позволит предельно просто улучшать качество работы действующих систем автоматики путем прямой замены ПИД-регуляторов на новые. При этом измерительная и исполнительная части модернизируются

систем управления могут оставаться прежними.

Важной особенностью, с точки зрения практики, является более определенная взаимосвязь между параметрами настройки USWO-регуляторов и показателями качества работы замкнутых систем автоматики. Это позволяет облегчить работу наладчиков замкнутых систем регулирования и сэкономить их время. Оправданно предполагать,

что в новых регуляторах процедура автоподстройки окажется значительно проще, чем у традиционных ПИД-регуляторов. ●

Основы USWO-способа регулирования

Способ представляет собой совокупность процедур, выполняемых в установленной последовательности. В результате их выполнения исходная информация о текущем состоянии управляемого объекта $X(t)$ однозначно преобразуется в конечный продукт — управляющее воздействие Y_p , подаваемое через исполнительный механизм (ИМ) на объект управления.

На рис. 8 представлена схема, отображающая состав процедур USWO-способа.

Установочные процедуры 1-3 связаны с подготовкой регулятора к работе с конкретным объектом. Они выполняются при настройке USWO-регулятора и включают в себя:

1) ввод параметров настроек K_1, K_2, K_3 , рассчитываемых с учетом динамических свойств объекта управления;

2) ввод задания X_s и допустимой величины зоны нечувствительности регулятора;

3) ввод характеристик исполнительного механизма (ИМ):

- в случае малоинерционного ИМ (пропорциональное звено) указываются ограничения на рабочий диапазон управляющего воздействия;

- в случае реверсивного ИМ с постоянной скоростью, помимо границ рабочего диапазона, вводится $T_{им}$ — время перемещения на 100%.

Установочные процедуры обязательны для всех универсальных регуляторов (характерный пример — ПИД-регуляторы), однако их состав и смысловое содержание отличаются. В первую очередь это касается параметров настройки, полностью зависящих от способа формирования управляющего воздействия (закона регулирования), используемого в регуляторе. Место параметров настройки K_1, K_2, K_3 в USWO-способе показано далее. С точки зрения удобства практической эксплуатации, важно, что рациональные настройки для USWO-регулятора рассчитываются проще, чем для традиционных ПИД-регуляторов. В связи с этим в USWO-регуляторе легче реализуется режим автоматической подстройки параметров K_1, K_2, K_3 под меняющиеся со временем свойства управляемых объектов.

В блоках 4-10 на рис. 8 показаны систематические процедуры. Они выполняются непрерывно в процессе работы USWO-регулятора со строго задаваемой

- периодичностью — t_s , зависящей от инерционности конкретного объекта управления.

- Процедура 4 включает в себя измерение текущего значения регулируемой величины $X(t)$, цифровую фильтрацию и занесение результата в стековый массив памяти, сохраняющий предысторию поведения $X(t)$.

- Процедура 5 — определение рассогласования $x(t)$ — представляет собой вычисление разности между измеренным значением регулируемой величины $X(t)$ и введенным при настройке заданием — X_s .

- Процедура 6 — оценка компонентов вектора состояния $x' = dx/dt$ и $x'' = d^2x/dt^2$ управляемого объекта производится приближенным методом численного дифференцирования (например, конечно-разностным) на основе данных об $X(t)$, хранящихся в стековой памяти.

- Процедура 7 — определение модуля корректирующего воздействия $Mod(Y)$. В USWO-способе формирования управления она применяется для ограничения величины корректирующего воздействия на объект. Значение модуля является функцией от абсолютной величины рассогласования x и компонентов вектора состояния x' и x'' : $Mod(Y) = K_1 \times F(|x|, |x'|, |x''|)$ (1)

Коэффициент пропорциональности K_1 является одним из параметров настройки USWO-регулятора. Оператор обеспечивает монотонную нарастающую зависимость $Mod(Y)$ от абсолютного значения каждой из указанных переменных x, x' и x'' .

- Процедура 8 — определение знака корректирующего воздействия: $j = +1$ или -1 . Она представляет собой особенность USWO-способа. В отличие от традиционного ПИД-алгоритма, знак корректирующего воздействия j не имеет прямого соответствия со знаком рассогласования — $Sign(x)$, а определяется по соотношению: $j = Sign[(x - K_2 \times Y \times x' - K_3 \times Y^3) \times Sign(x')]$ (2)

или $j = Sign(x - K_2 \times x^2) \times Sign(x')$ (3)

Соотношение (2) применяется при использовании в системе реверсивного ИМ с постоянной скоростью перемещения, а в случае малоинерционного ИМ применяется (3). K_2 и K_3 — параметры настройки USWO-регулятора. Соотношения (2) и (3) выведены на основе анализа решений задач оптимального управления, полученных для ряда конечномерных динамических объектов.

- Процедура 9 — расчет управляющего воздействия Y_p — выполняется по вполне очевидной формуле:

$$Y_p = Y(t) + j \times Mod(Y) \quad (4)$$

Процедуры 10а и 10б реализуют выдачу управления Y_p на объект в зависимости от типа ИМ, используемого в системе. В случае малоинерционного ИМ значение Y_p через ЦАП направляется на ИМ в виде унифицированного выходного сигнала USWO-регулятора. В случае реверсивного ИМ с постоянной скоростью регулятор рассчитывает продолжительность управляющего импульса:

$$t_y = Mod(Y) \times T_{им} / 100 \quad (5)$$

и замыкает выходной ключ «Больше», если знак коррекции положителен ($j = +1$), или ключ «Меньше», если знак коррекции отрицателен ($j = -1$). Реализацию расчетной длительности управляющего импульса (5) регулятор контролирует по таймеру.

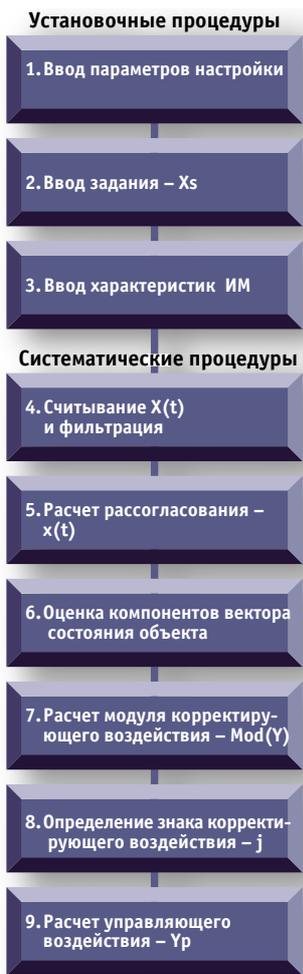


Рис. 8. Состав процедур USWO-способа формирования управления