

Владимир Ивайкин

Использование скользящих режимов в регулировании

Регулирование процесса можно считать регулированием, если можешь спроектировать для процесса закон его развития.

Мечта кибернетика

ВВЕДЕНИЕ

При управлении динамическими объектами нередко ставится задача достижения оптимума в том или ином смысле. Обычно критерием оптимальности выбирают минимизацию времени переходного процесса из одного статического состояния в другое. При этом немаловажным является требование обеспечения плавности такого перехода, которое в то же время является и существенным ограничением на пути достижения оптимальности, так как при неплавном управлении можно быстрее изменить состояние объекта. Применительно к управлению технологическими процессами неплавное управление ведёт к возникновению перегрузок и часто является причиной аварии. Поэтому в дополнение ко всем прочим требованиям для регуляторов, используемых в промышленности, безусловно, нужно добавить требование высокой надёжности.

Развитие цифровых способов управления позволяет создавать новые уникальные регуляторы на базе таких, казалось бы, старых и давно испробованных алгоритмов, каким является алгоритм управления с использованием скользящего режима (скользящего) [1]. Способ управления с использованием скользящего режима отличается чрезвычайно высокой надёжностью, поскольку он предполагает вынуждающее управление, заставляющее процесс протекать по динамической траектории, которую задаёт разработчик. Этому способу был присущ до недавнего времени один недостаток — необходимость в идеальном дифференцировании, что является большой проблемой для аналоговой техники управления. Между

тем он имеет массу замечательных преимуществ, и некоторые из них изложены в данной статье. Все представленные алгоритмы были проверены путём цифрового моделирования.

Надеюсь, что разработчики смогут успешно использовать данный способ с целью построения оптимальных и надёжных регуляторов.

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СКОльзяЩЕГО РЕЖИМА

Чтобы изобразить поведение системы в динамике, лучше всего использовать фазовую плоскость, которая содержит в качестве одной из координат скорость изменения состояния системы \dot{x} . Второй координатой обычно является состояние системы x , а для регулятора лучше подходит отклонение состояния от заданного x_0 , то есть ошибка регулирования $\Delta x = x_0 - x$.

Каждая динамическая система имеет, по крайней мере, два вида траекторий изменения состояния в фазовой плоскости: траекторию разгона A_+ и траекторию торможения A_- . Так вот, первым условием возникновения скользящего режима является сим-

метричность этих траекторий. На рис. 1 показаны траектории разгона и торможения, которые имеют форму параболы; при разгоне регулятор выдаёт предельно допустимое управляющее воздействие u со знаком плюс, а при торможении — со знаком минус.

Вторым условием возникновения скользящего режима будет наличие переключений регулятора, при которых происходит переход с одной траектории на другую. Задачей разработчика регулятора является расчёт и построение линии переключения Γ . Очевидно, что ось симметрии траекторий, то есть ось ординат, не может быть выбрана в качестве такой линии — в противном случае в системе будут происходить незатухающие колебания. Поэтому линия переключения должна иметь некоторый наклон. График на рис. 2 соответствует режиму скользящего режима, при котором имеются колебания, но эти колебания быстро затухают. Здесь движение начинается из произвольной точки на траектории разгона. В точке 1 происходит первое переключение, и система начинает двигаться с торможением. В

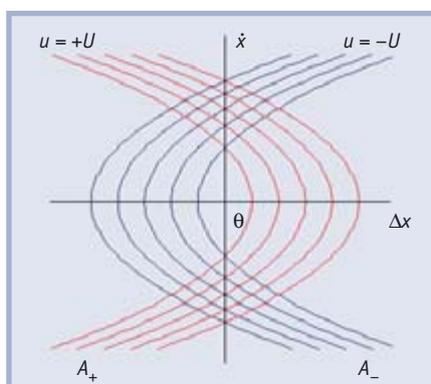


Рис. 1. Фазовый портрет системы регулирования

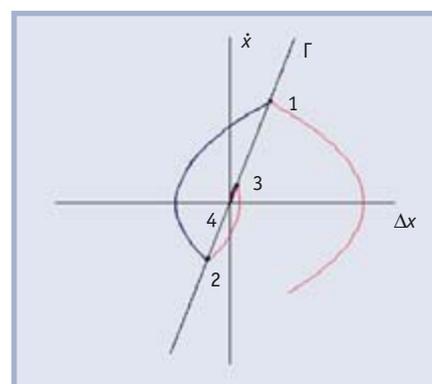


Рис. 2. Последовательность переключений при скользящем режиме по прямой

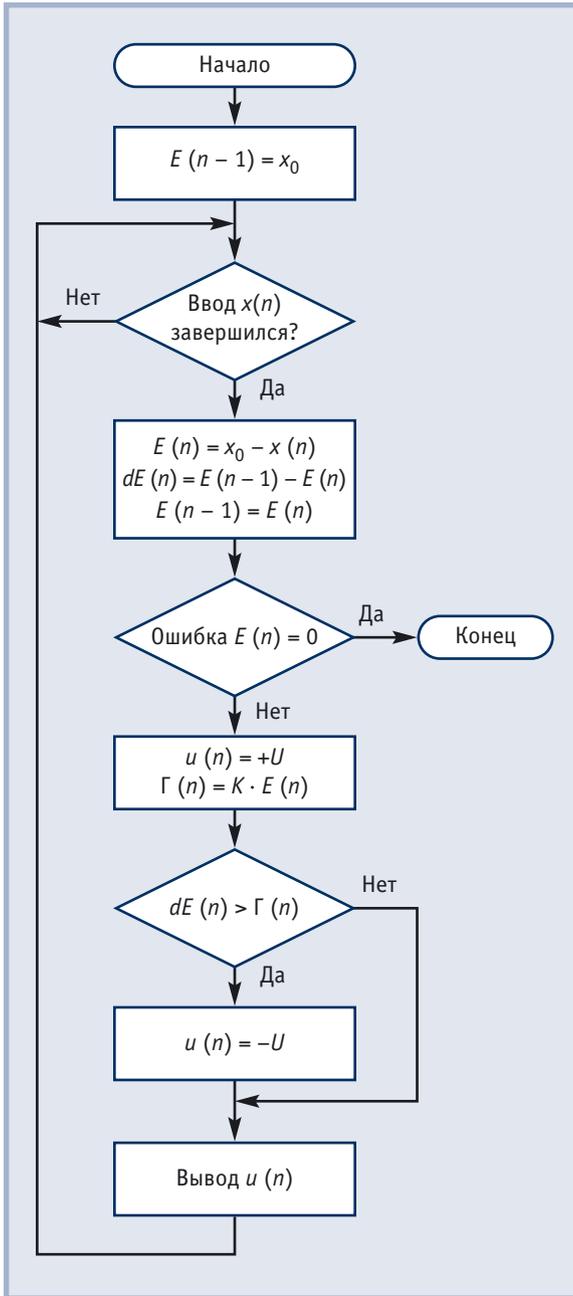


Рис. 3. Блок-схема основного алгоритма работы «скользящего» регулятора

точке 2 снова происходит переключение, но скольжение ещё не начинается. Оно начинается только после переключения в точке 3 и продолжается на всём участке от 3-й до 4-й точки. Именно здесь проявляется третье, основное условие возникновения скольжения. Оно заключается в том, что в точке переключения угол наклона линии переключения становится равным или меньшим угла наклона касательной к траектории. При этом условии точка, характеризующая текущее состояние системы, непрерывно переходит с траектории разгона на траекторию торможения и обратно, как бы скользя вдоль линии переключения. По мере того, как

число переключений стремится к бесконечности, точка текущего состояния системы асимптотически приближается к точке равновесия 4.

При построении линии переключения можно достичь соблюдения условий возникновения скольжения уже после первого переключения. После начала скольжения движение становится вынужденным и получает особую устойчивость. Однако каждое переключение — это потеря времени, что делает движение неоптимальным. Следовательно, разработчику нужно выбирать между оптимальностью по временным критериям и устойчивостью.

СОСТАВ РЕГУЛЯТОРА СКОльзяЩЕЙ СИСТЕМЫ

Принцип действия регулятора заключается в выборе ускорения, с которым система будет двигаться до момента следующего переключения. Между переключениями движение в системе проходит равноускоренно с попеременным изменением знака ускорения.

В состав регулятора входят следующие элементы:

- вычислитель ошибки;
- вычислитель значения функции, описывающей линию переключения;
- вычислитель скорости изменения ошибки;
- вычислитель отклонения скорости изменения ошибки от соответствующего значения функции, описывающей линию переключения;
- вычислитель знака отклонения скорости;
- вычислитель величины управляющего воздействия.

При использовании цифрового способа обработки информации каждый из вычислителей реализуется очень просто и эффективно. Последовательность вычислений соответствует последовательности, с которой они перечислены.

Ошибка регулирования $\Delta x = x_0 - x$ обозначим буквой E , как это принято в теории автоматического управления. После того как с помощью цифрового измерителя в текущем n -м такте управления в систему была введена новая величина $x(n)$ при известном задании x_0 , ошибка определяется как

$$E(n) = x_0 - x(n) \quad (1)$$

После этого вычисляется соответствующее значение функции, описывающей линию переключения:

$$\Gamma(n) = K \times E(n) \quad (2)$$

Здесь K задаёт наклон прямой линии относительно абсциссы фазовой плоскости (рис. 2).

Далее вычисляется скорость изменения ошибки. Учитывая малую величину времени измерения (время такта), её можно выразить через дифференциал ошибки следующим образом:

$$dE(n) = E(n-1) - E(n) \quad (3)$$

Здесь $E(n-1)$ — величина ошибки в предыдущем такте.

Исходя из тех же соображений относительно времени измерения, отклонение скорости изменения ошибки от соответствующего значения функции, описывающей линию переключения, можно выразить так:

$$d\Gamma(n) = \Gamma(n) - dE(n) \quad (4)$$

Знак отклонения:

$$\text{sign } d\Gamma(n) = \begin{cases} 1, & \text{если } d\Gamma(n) > 0 \\ -1, & \text{если } d\Gamma(n) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

И, наконец, величина управляющего воздействия (ускорения) вычисляется умножением:

$$u(n) = U \times \text{sign } d\Gamma(n) \quad (6)$$

Здесь U — абсолютная величина ускорения.

ОСНОВНОЙ АЛГОРИТМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Блок-схема основного алгоритма работы «скользящего» регулятора приведена на рис. 3.

Цикл работы регулятора начинается вводом нового значения регулируемой величины $x(n)$ и завершается

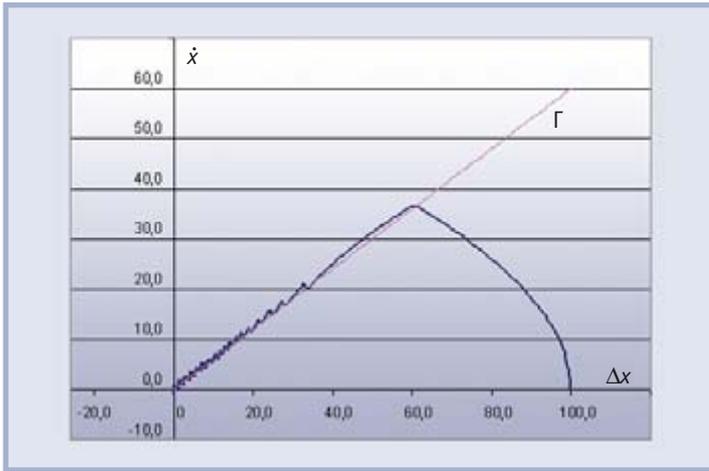


Рис. 4. Фазовая диаграмма работы регулятора в соответствии с основным алгоритмом

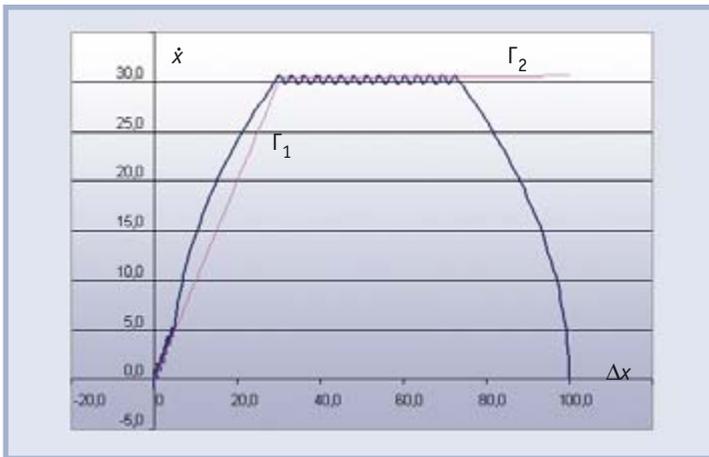


Рис. 6. Фазовая диаграмма работы регулятора с двумя линиями переключения

выводом величины управляющего воздействия $u(n)$. Определение величины управляющего воздействия заключается в выборе из двух возможных значений: $+U$ или $-U$. Алгоритм выбора основывается на сравнении скорости изменения ошибки dE со значением линейной функции при данной ошибке $\Gamma(E)$, которые рассчитываются по формулам (1)...(6).

Если скорость изменения ошибки dE не превышает значения $\Gamma(E)$, то управляющее воздействие положительно, а иначе — отрицательно. Циклы повторяются до тех пор, пока ошибка управления не станет равной нулю. Вне цикла в блоке начальных значений задаётся величина ошибки предыдущего цикла $E(n-1)$, которая соответствует заданию, то есть x_0 . Быстродействие, или скорость реакции регулятора зависит от скорости, с которой новые данные считываются с измерительного устройства и записываются в исполняющую часть системы регулирования. На рис. 4.

показана фазовая диаграмма работы регулятора по данному алгоритму.

УЛУЧШЕННЫЙ АЛГОРИТМ РАБОТЫ

Недостатком основного алгоритма часто оказывается то, что регулируемая величина в некоторые моменты времени стремится к заданному значению со слишком большой скоростью. Это может стать причиной аварий или поломок оборудования. Для ограничения скорости можно несколько усовершенствовать линию переключения, сделав её нелинейной.

На рис. 5 приведена блок-схема алгоритма работы регулятора с двумя линиями переключения Γ_1 и Γ_2 , которые пересекаются в заданной точке фазового пространства. Варьируя коэффициенты K_1 , K_2 и K_3 , можно выбрать наклон линий и положение точки

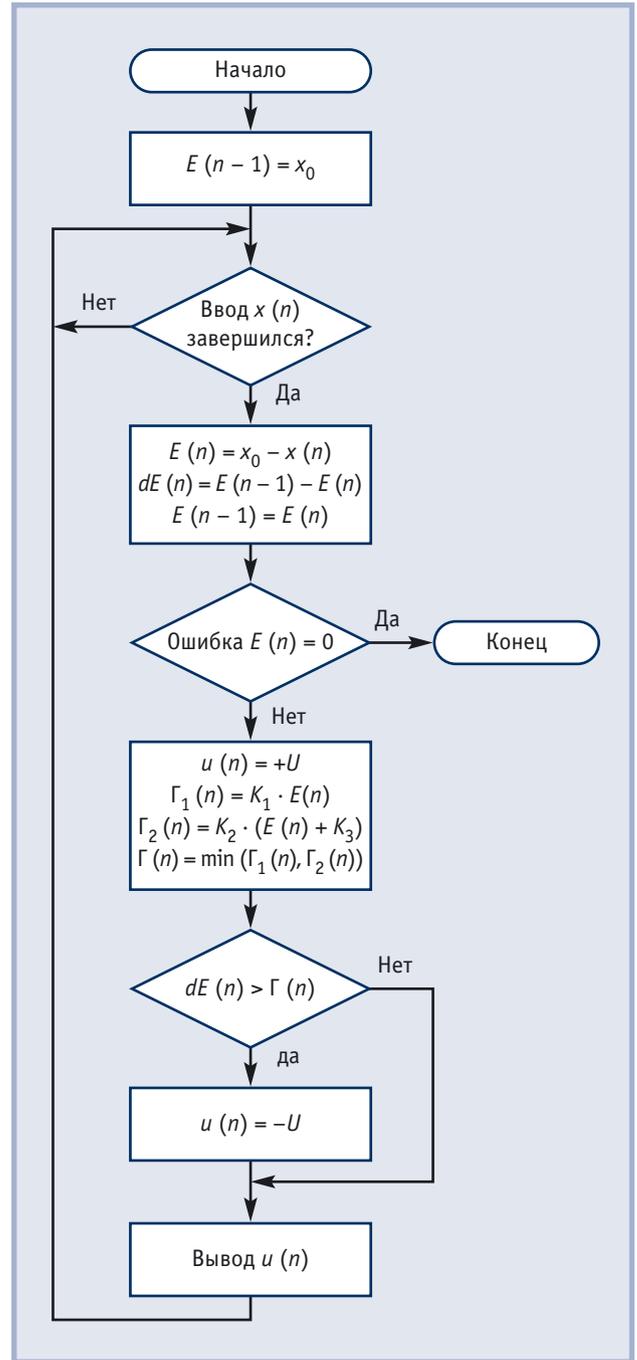


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы регулятора с двумя линиями переключения

пересечения. Отличие этого алгоритма заключается в том, что в качестве линии переключения выбирается та, которая при данной ошибке регулирования проходит ниже, то есть описывающая её функция принимает меньшие значения.

На рис. 6 показана фазовая диаграмма работы регулятора с двумя линиями переключения. Как видно из рисунка, скорость изменения регулируемой величины ограничивается линией переключения Γ_2 . Весь процесс регулирования протекает в первом квадранте фазовой плоскости, из чего следует, что ни скорость, ни ошибка регуля-

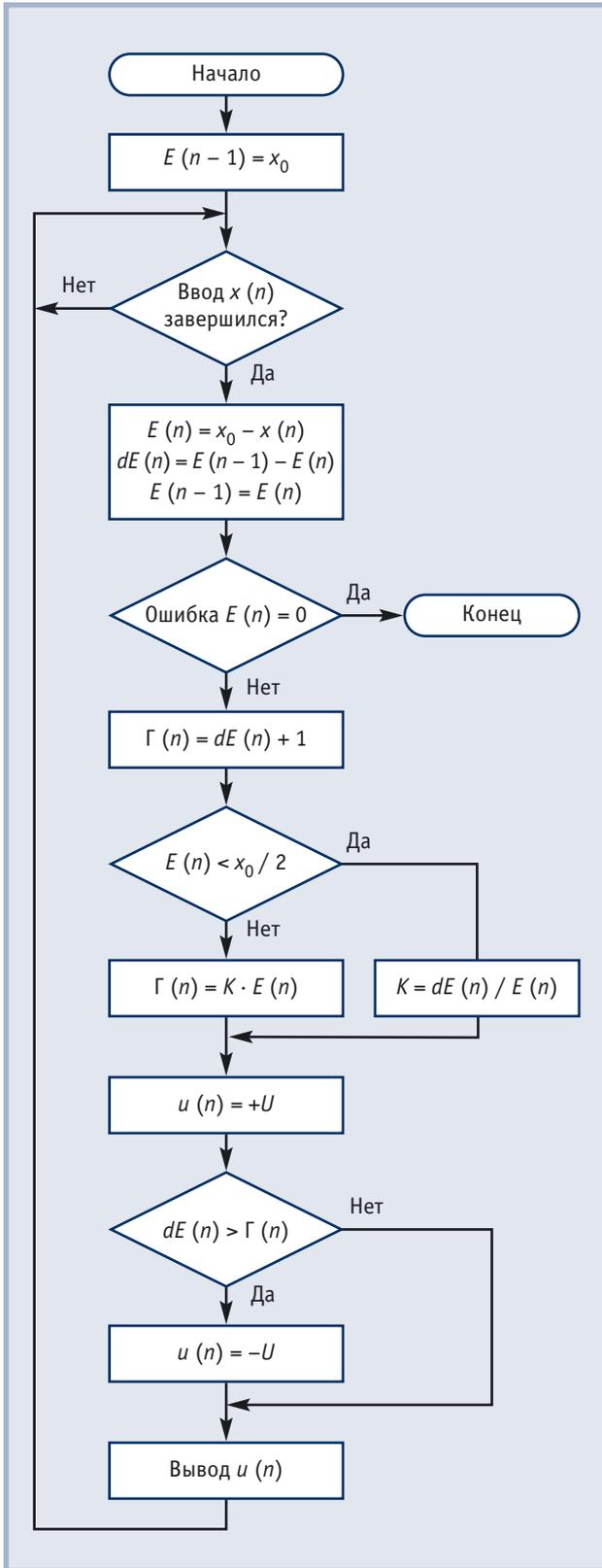


Рис. 7. Блок-схема алгоритма работы оптимального регулятора с использованием скользящего режима

вания не меняют своего знака. Это означает, что переходный процесс протекает плавно и без перерегулирования.

Алгоритм оптимального регулятора

Как известно, минимальное время переходного процесса достигается то-

Такой алгоритм очень легко можно построить в алгоритм работы «скользящего» регулятора. Для этого достаточно отследить момент, когда будет пройдена половина заданного значения регулируемого параметра. В этот момент, исходя из скорости и величины ошибки, вычисляется наклон ли-

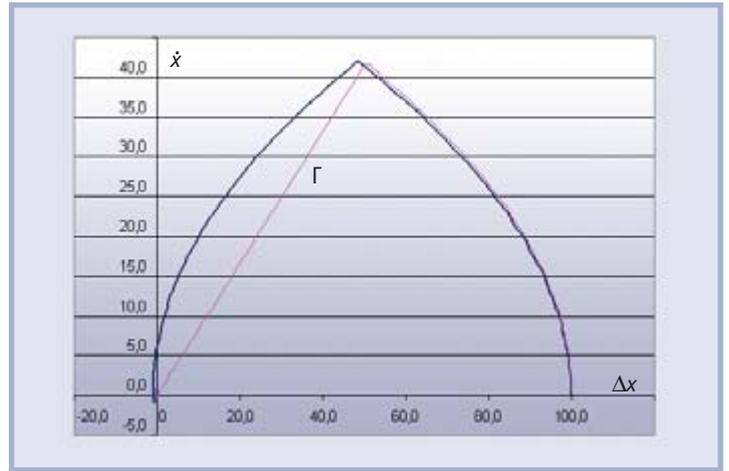


Рис. 8. Фазовая диаграмма работы оптимального регулятора

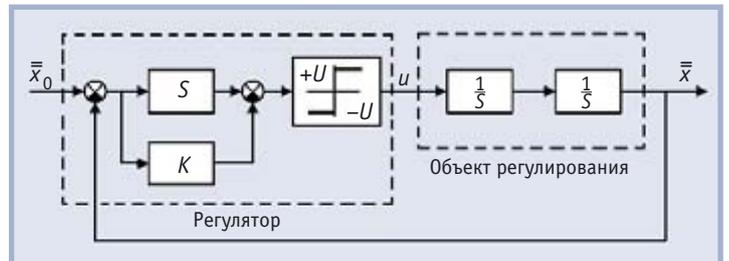


Рис. 9. Схема системы регулирования объекта с симметричным фазовым портретом

гда, когда его первая половина происходит с максимально возможным ускорением, а вторая – с максимальным торможением. Например, в практике судоходства часто встречаются команды «полный вперёд» и «полный назад». Вторая команда означает не движение назад в буквальном смысле, а движение вперёд с максимальным торможением. При этом винты корабля действительно вращаются в обратную сторону с максимальными оборотами. В результате происходит плавное передвижение с остановкой в заданной точке за минимальное время.

нии переключения для второй половины переходного процесса. В первой половине линии переключения как таковой нет, а её роль для определённости алгоритма будет выполнять кривая изменения скорости, сдвинутая на единицу вверх, то есть расположенная параллельно и отстоящая на малом расстоянии от исходного положения.

При точном расчёте переходный процесс завершится в нулевой точке фазовой плоскости. Если же произойдёт непредвиденное отклонение, но это будет скольжение вблизи нуля, и его время будет столь малым, что им можно пренебречь. На рис. 7 приведена блок-схема алгоритма работы такого оптимального регулятора.

На рис. 8 показана диаграмма процесса оптимального регулирования в фазовой плоскости, полученная путём цифрового моделирования. Перерегулирование составило около 1%.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С ПОЛИНОМИАЛЬНЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ

До сих пор предполагалось, что объект регулирования имеет фазовый портрет, на котором траектории разгона и торможения строго симмет-

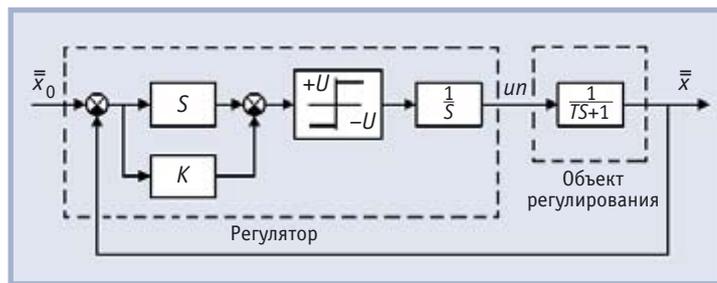


Рис. 10. Схема системы регулирования объекта с полиномиальными траекториями

ричны и имеют вид парабол. Схема такой системы приведена на рис. 9. В ней объект регулирования состоит из двух интеграторов, обозначенных в виде двух звеньев $\frac{1}{s}$ в терминах преобразования Лапласа. Регулятор состоит из измерителя скорости в виде звена дифференцирования S , построителя линии переключения в виде пропорционального звена K , переключающегося реле $(+U/-U)$ и двух сумматоров.

Однако объекты с таким фазовым портретом встречаются очень редко. В качестве примера можно назвать лишь космические летательные аппараты. Отсутствие сопротивления движению в космосе способствует тому, что накопленная инерция движения не уменьшается со временем и для торможения космического аппарата нужно прикладывать ускорение, противоположно направленное движению.

Однако в большинстве случаев объекты управления имеют в своём составе или, равно этому, в составе окружающего их пространства всевозможные источники сопротивления управляющему воздействию. Из теории регулирования известно, что такие объекты описываются схемами с одним или несколькими апериодическими звеньями. Динамические свойства апериодического звена принципиально отличаются от свойств интегратора. Главное отличие заключается в том, что оно не способно накапливать энергию управляющего воздействия, из-за чего с исчезновением управляющего воздействия объект возвращается в исходное состояние покоя. Это приводит к тому, что все траектории разгона и торможения для апериодических звеньев заканчиваются на оси абсцисс, так как скорость после первоначального изменения в конце концов всегда стремится к нулю.

Чтобы использовать скользящий режим для управления такими объекта-

ми, в состав регулятора необходимо ввести интегратор. Сочетание апериодического звена, которым описывается объект регулирования, с интегратором, введённым в состав регулятора для улучшения траекторий, вызывает некоторое искажение исходного фазового портрета (рис. 1), заключающееся в том, что уменьшение траектории после каждого переключения будет происходить по закону спирали. Вид таких траекторий отличен от параболы, их можно описать полиномами более высокого порядка, поэтому и называются они полиномиальными. В данном случае линией переключения может быть и ось симметрии, то есть ось ординат, что является дополнительным стабилизирующим фактором.

На рис. 10 показана схема системы регулирования объекта с полиномиальными траекториями. На ней объект регулирования представлен в виде одного апериодического звена $\frac{1}{Ts+1}$, имеющего среднюю постоянную интегрирования T .

Как показывает цифровое моделирование, в этом случае все представленные в статье алгоритмы остаются практически без изменений. Добавка интегратора в состав регулятора приводит к тому, что управляющее воздействие будет иметь вид линейно возрастающего воздействия во время разгона и линейно уменьшающегося во время торможения. Поэтому в блок-схемах алгоритмов (рис. 3, 5, 7) следует изменить лишь самый нижний блок. В этом блоке выводу управляющего воздействия $u(n)$ будет соответствовать вывод нового воздействия $u(n)$, которое рассчитывается по формуле суммирования со значением из предыдущего цикла управления:

$$u(n) = u(n - 1) + u(n) \quad (7)$$

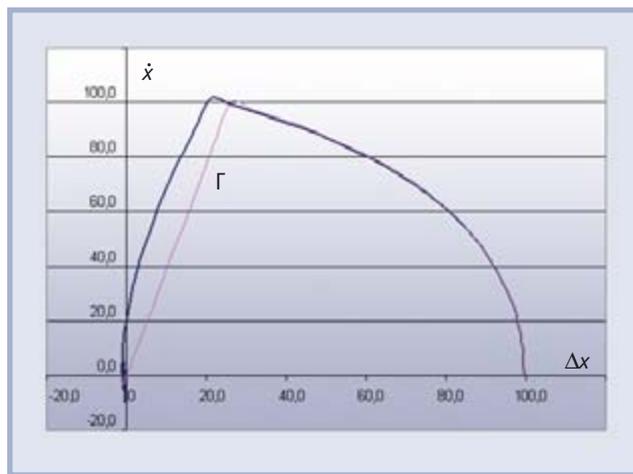


Рис. 11. Фазовая диаграмма работы оптимального регулятора апериодического объекта

Всё остальное не меняется. Возможно, только для оптимального регулятора следует производить переключение несколько позже, чем в середине ошибки регулирования. Это является следствием отличия параболы от полиномиальных кривых более высокого порядка. На рис. 11 показана фазовая диаграмма работы оптимального регулятора апериодического объекта. Здесь моменту переключения соответствует приблизительно 30-процентная ошибка регулирования. Момент переключения оптимального регулятора всегда можно подобрать экспериментальным путём. Впрочем, совсем нетрудно усовершенствовать алгоритм оптимального регулятора процедурой автоматического расчёта момента переключения, исходя из результатов работы в течение нескольких циклов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В одной статье невозможно описать все нюансы регулирования с использованием скользящего режима. В настоящее время с развитием цифровых методов обработки этот способ регулирования становится всё более распространённым. В нём скрыты большие возможности и большие резервы для построения надёжных, оптимальных и самонастраивающихся систем управления. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Сю Д., Мейер А. Современная теория автоматического управления и её применение. — М.: Машиностроение, 1972.

Автор — сотрудник
 ЗАО ЦОФ «Сибирь»
 Телефон/факс: (38474) 362-75