

В.А. Кутрубас
ведущий инженер-программист
Email: vladimirus@sensorika.ru

Е.Е. Сычева
инженер
Email: mail@sensorika.ru
(ООО НПФ “Сенсорика”)

г. Екатеринбург, Российская Федерация

Эффективный ПИД регулятор

В данной статье описаны проблемы практической реализации пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) регуляторов. Показано влияние насыщения исполнительного устройства на качество регулирования. Произведено сравнение методов борьбы с данным явлением. Приведено сравнение эффективности распространенных методов автоматической настройки ПИД регуляторов. Произведено экспериментальное сравнение качества регулирования регулятора Сенсорика и широко распространенного (“стандартного”) на российском рынке регулятора.

Ключевые слова: алгоритм ПИД регулятора; эффективный ПИД регулятор; насыщение исполнительного устройства; коэффициенты настройки; самонастройка.

V.A. Kutrubas
Senior Software Engineer
Email: vladimirus@sensorika.ru

E.E. Sycheva
Engineer
Email: mail@sensorika.ru
(LLC SPF “Sensorika”)
Ekaterinburg, Russian Federation

Effective PID Controller

This paper describes the practical implementation of the proportional-integral-derivative (PID) controllers. Shows the effect of the saturation of the actuator to control quality. A comparison method for dealing with this phenomenon. The comparison of the effectiveness of common methods of automatic tuning PID controllers. The experimental comparison of the quality control, the controller “Sensorika” and widespread (“standard”) in the Russian market regulator.

Keywords: PID algorithm; effective PID controller; actuator saturation; coefficients customization; bootstrapping.

Принцип ПИД регулирования довольно прост и был изобретен уже более 100 лет назад, но его практические реализации, обеспечивающие высокие показатели качества, до сих пор постоянно совершенствуются производителями.

НПФ “Сенсорика” на основе многолетнего опыта разработала алгоритмическое обеспечение, призванное удовлетворять различные запросы потребителей. Разработанные решения были положены в основу приборов: TP101, TP102, TP103 и TP106.

Алгоритм ПИД регулятора

Методы подавления насыщения контура регулирования

При проектировании контура с ПИД регулятором зачастую камнем преткновения является нелинейность исполнительного устройства (ИУ) типа “насыщение” (рис. 1). Например, нагреватель в печи на практике не может выдать более 100 % мощности, и не может реализовать отрицательный сигнал, рассчитанный регулятором. При выходе на режим ИУ, “застывшее”

в крайнем положении, вызывает избыточное накопление сигнала ошибки интегратором ПИД регулятора, что приводит к существенному и иногда недопустимому

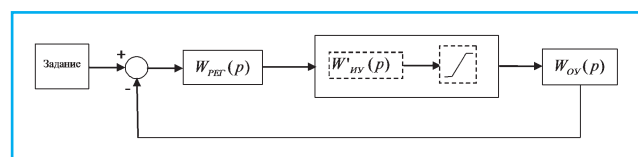


Рис. 1. Контур ПИД регулятора с нелинейностью типа “насыщение”:

$W_{\text{рег}}(p)$ – передаточная функция ПИД регулятора;

$W'_{\text{ИУ}}(p)$ – передаточная функция, описывающая “основную” динамику ИУ;

\square – блок нелинейности типа “насыщение”;

$W_{\text{об}}(p)$ – передаточная функция объекта управления.

Передаточная функция ПИД регулятора:

$$W_{\text{рег}}(p) = K_{\text{рег}} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} \cdot p} + T_{\text{д}} \cdot p\right),$$

где: $K_{\text{рег}}$ – пропорциональный коэффициент;

$T_{\text{и}}$, $T_{\text{д}}$ – постоянные времени интегрирования и дифференцирования;

p – переменная преобразования Лапласа.

перерегулированию при выводе объекта управления (ОУ) на заданный режим (рис. 3).

Перерегулирование тем больше, чем больше разница между расчетным сигналом регулятора и фактическим выходом ИУ. В большинстве регуляторов данная проблема или не решается, или решается только частично. Например, интегральной составляющей не позволяют выходить за заданные границы. Технологам, применяющим регуляторы с эффектом интегрального насыщения (ЭИН), приходится пускаться на всяческие ухищрения, в частности:

- “ослаблять” настройки для уменьшения перерегулирования, что приводит к увеличению времени выхода ОУ на режим и/или к увеличению времени отработки возмущений;
- применять свой набор коэффициентов для каждой уставки;
- выводить объект на уставку в ручном режиме.

НПФ “Сенсорика” разработала собственный, на взгляд авторов, один из наиболее совершенных на рынке метод борьбы с ЭИН. В нем алгоритм ПИД регулятора учитывает фактический выходной сигнал ИУ, получаемый прямо (например, нагреватель управляемый широтно-импульсной модуляцией, ШИМ) или косвенно по модели объекта управления (в случае использования интегрирующих ИУ без обратной связи по положению), (рис. 2).

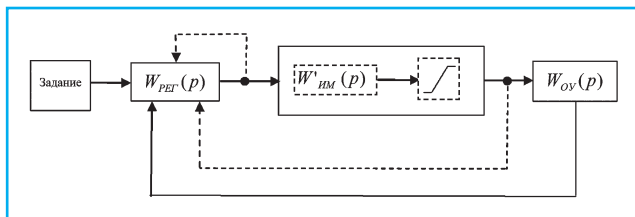


Рис. 2. Контур с ПИД регулятором Сенсорика

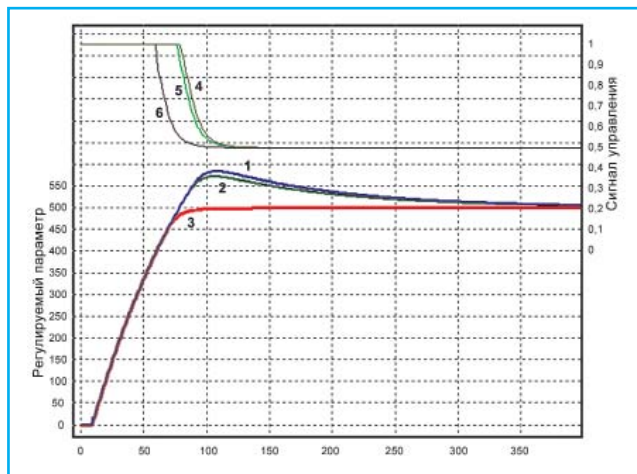


Рис. 3. Выход на уставку ПИД регуляторов с разным алгоритмом подавления насыщения, где: кривые 1 и 4 – регулятора без системы подавления с ЭИН; кривые 2 и 5 – регулятора с подавлением ЭИН путем ограничения выхода интегратора; кривые 3 и 6 – регулятора Сенсорика с эффективной системой подавления ЭИН. Кривые регулируемого параметра – 1...3, кривые сигнала управления – 4...6 (результаты получены на математической модели)

Обратные связи, изображенные на рисунке пунктирными линиями, реализованы программно внутри регулятора. Таким образом, как и в большинстве промышленных регуляторов, измеряется только регулируемая величина. При этом в отличие от многих других алгоритмов, в том числе описанных в работе [1...4], не требуется задавать какие-либо дополнительные коэффициенты, усложняющие работу наладчика контура. На рисунке 3 приведены результаты математического моделирования.

Из графиков рисунка 3 видно, что качественная система подавления ЭИН (кривые 3, 6) позволяет:

- автоматически выводить ОУ на уставку без перерегулирования;
- для настройки использовать те же коэффициенты, что и для настройки идеального регулятора без ограничений на ИУ;
- приблизить время выхода на режим к минимальному.

Критерии оптимизации контура регулирования

В подавляющем большинстве регуляторов, включая продукцию многих ведущих зарубежных производителей, используется один и тот же набор коэффициентов при выходе на уставку и при отработке возмущающих воздействий на объект. Коэффициенты, позволяющие выходить на уставку без перерегулирования (говорят, что регулятор оптимизирован по заданию), не позволяют достаточно быстро обрабатывать внешние возмущения. В свою очередь коэффициенты, позволяющие эффективно обрабатывать внешние возмущения (говорят, что регулятор оптимизирован по нагрузке) приводят к большому перерегулированию при выходе на уставку.

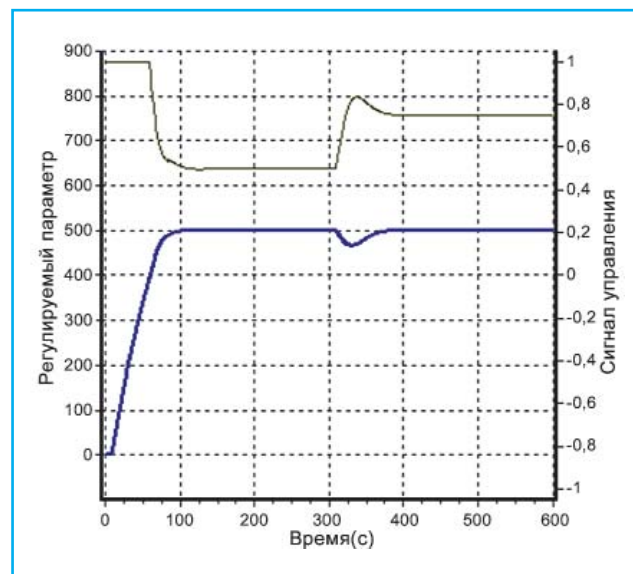


Рис. 4. Регулятор Сенсорика с автоматически переключаемыми наборами коэффициентов, быстрый выход на режим без перерегулирования сочетается с быстрой отработкой возмущений по нагрузке (результаты получены на математической модели)

Контур регулирования с одним набором коэффициентов, каким бы эффективным метод его получения не был, не может считаться оптимальным. Получая такой регулятор, технолог неизбежно сталкивается с трудностями. Например, требуется, чтобы регулятор отлично работал в режиме, и при этом быстро на него вышел. В этом случае персоналу предприятия ничего не остается, кроме как вручную при каждом запуске управлять ИУ и лишь при достижении уставки, перевести его в автоматический режим. Регуляторы НПФ “Сенсорика” решают данную задачу не путем выбора компромиссных “средних” настроек, а путем автоматического безударного переключения между двумя наборами коэффициентов. При старте или смене уставки прибор использует коэффициенты “по заданию” и практически по достижении уставки переключается на набор коэффициентов “по нагрузке” (рис. 4). Оба набора могут быть получены в ходе процедуры автоматической настройки. Данную схему на сегодняшний день авторы считают оптимальной, однако при желании пользователь всегда может переключиться на режим работы с одним набором коэффициентов.

Автоматическая настройка ПИД регулятора

Автоматическая настройка (АН) избавляет технолога от сложной задачи выбора коэффициентов, качественное решение которой требует серьезных знаний из области САУ.

Практически все регуляторы ведущих производителей имеют АН, но во многих из них ее эффективность невысока вследствие:

- больших погрешностей методов идентификации объектов (например, метода анализа колебаний при релейном регулировании);

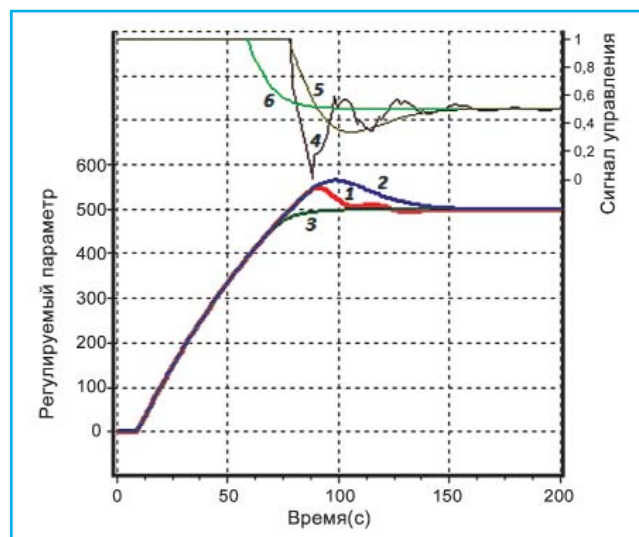


Рис. 5. Выход на уставку ПИД регуляторов с настройками, полученными разными методами, где: кривые 1 и 4 – по методу Зиглера-Никольса; кривые 2 и 5 – по методу Коэна-Куна а, кривые 3 и 6 – по методу используемому НПФ Сенсорика, критерий “по заданию”. Кривые регулируемого параметра – 1...3, кривые сигнала управления – 4...6 (результаты получены на математической модели)

- использования при расчетах коэффициентов методов имеющих высокие погрешности, например, методы Зиглера-Никольса [5, 6], Коэна-Куна [7, 8] и др. (рис. 5);

- отсутствие у пользователя возможностей устанавливать критерии оптимизации контура и влиять на “агрессивность” настроек;

- отсутствия приемлемых методов борьбы с нелинейностями ИУ.

В основе процедуры АН регуляторов НПФ “Сенсорика” лежат эффективные аналитические методы современной теории автоматического управления. По итогам АН, синтезируется три набора коэффициентов. Два из них обеспечивают высокую скорость выхода на уставку без перерегулирования (критерий “по заданию”) и отличаются запасом устойчивости (выше скорость – меньше устойчивость). Третий обеспечивает высокую скорость отработки возмущений без перерегулирования (критерий “по нагрузке”) при солидном запасе устойчивости.

Экспериментальное сравнение качества регулирования регулятора Сенсорика и стандартного регулятора

Экспериментальное сравнение проводилось на объекте управления, описываемом передаточной функцией:

$$W_{ov}(p) = \frac{K}{T \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau p}, \quad \text{где } K = 800, T = 100, \tau = 10.$$

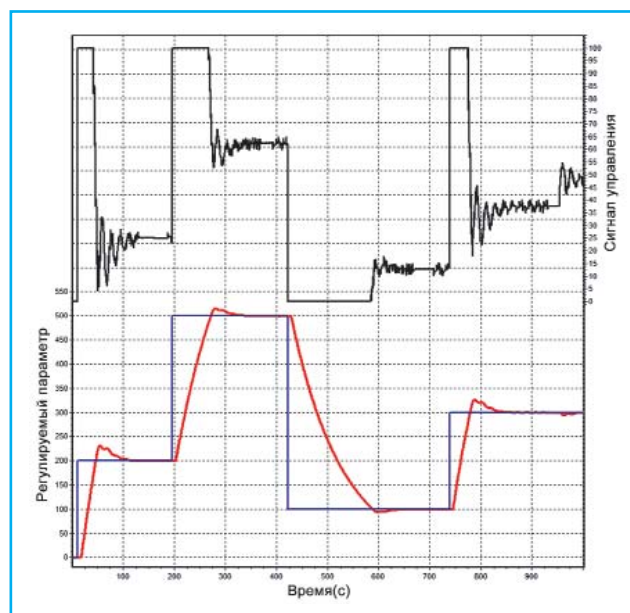


Рис. 6. Переходные процессы в контуре со стандартным регулятором:

- высокое перерегулирование 17 %;
 - резкая динамика ИУ;
 - при выходе на уставку потребовалось 8...12 реверсов, как следствие – высокий износ ИУ.
- Итог: низкие показатели качества, высокий износ ИУ, в лучшем случае требуется серьезная коррекция коэффициентов

В ходе эксперимента сравнивались прибор TP103 производства НПФ “Сенсорика” и экземпляр одной из наиболее распространенных на российском рынке моделей. Эту модель с полным правом в рамках данной статьи можно назвать “стандартной”.

В качестве модели объекта был использован регистратор Ш9329A016 с графическим дисплеем, имитация производилась математическими средствами регистратора. Сигнал управления регулятора в виде тока подавался на вход регистратора, регулируемый параметр, рассчитанный регистратором, так же в виде сигнала тока передавался на вход регулятора. Перед анализом переходных характеристик каждый из регуляторов автоматически настраивался на объект управления (этап АН показан только для регулятора Сенсорика (рис. 6)).

Информационный обмен с приборами осуществлялся по стандартному в промышленности протоколу ModBus.

Итоги результатов сравнения представлены в таблице 1.

Сравнение переходных процессов при выходах на уставку (рис. 6, 7)

Сравнение устойчивости контуров регулирования при изменении параметров ОУ (рис. 8, 9)

Регуляторы автоматически настраиваются на один объект с $K = 800$, $T = 100$, $\tau = 5$. Затем время транспортно-запаздывания необходимо увеличить в 2 раза ($\tau = 10$) и проанализировать переходные процессы. Тем самым, имитируется уход одного из параметров объекта в процессе эксплуатации.

Выводы

В таблице 1 представлены сравнительные характеристики стандартного ПИД регулятора и ПИД регулятора НПФ “Сенсорика”.

Приборная реализация

Описанные алгоритмы реализованы в ПИД регуляторах серии TP100. Серия включает в себя следующие приборы:

- TP101 – универсальный одноканальный регулятор;
- TP102 – двухканальный регулятор;

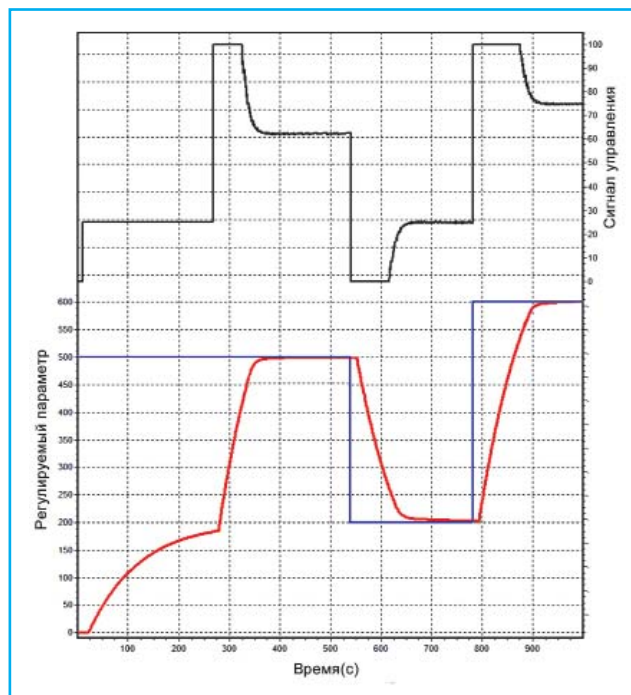


Рис. 7. Переходные процессы в контуре с регулятором Сенсорика:

- перерегулирование отсутствует;
- время выхода на уставку в 1,5 раза меньше, чем у стандартного регулятора, и близко к минимальному;
- плавная динамика ИУ, реверсы отсутствуют.

Итог: высокие показатели качества, характер переходных процессов не зависит от уставки, минимальный расход ресурса ИУ, вмешательство оператора не требуется

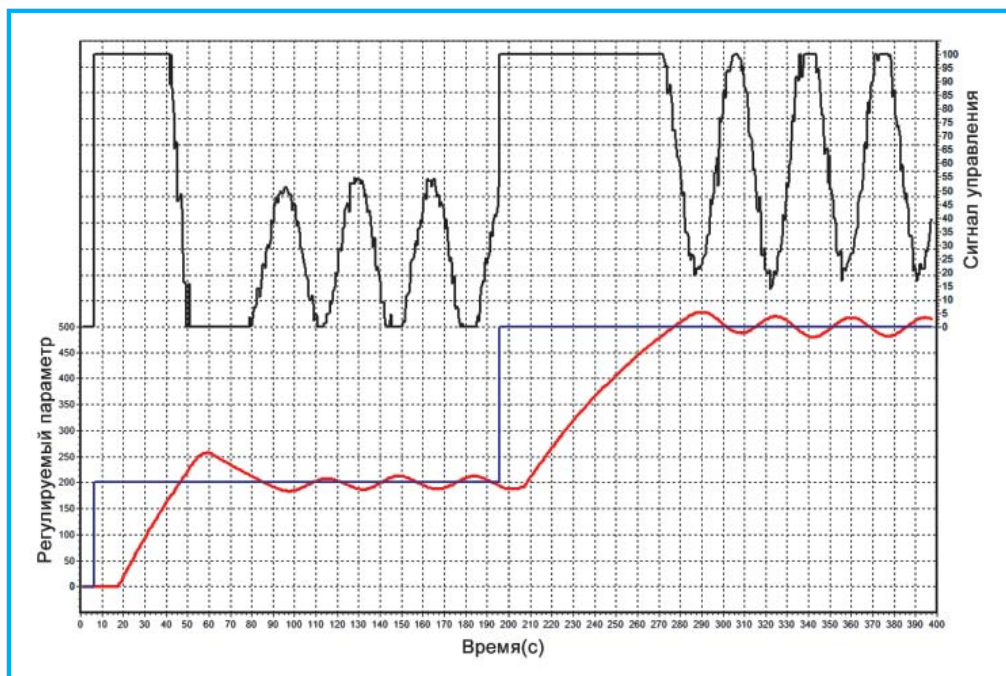


Рис. 8. Переходные процессы в контуре со стандартным регулятором:

- перерегулирование 27 %;
- установившийся режим не может быть достигнут, размах автоколебаний 15 %.

Итог: контур перешел в аварийное состояние, близкие показатели качества могли быть обеспечены двухпозиционным регулятором, если изменение параметров объекта есть неотъемлемая часть технологического процесса (например, различное количество сырья в печи), такой регулятор использовать невозможно

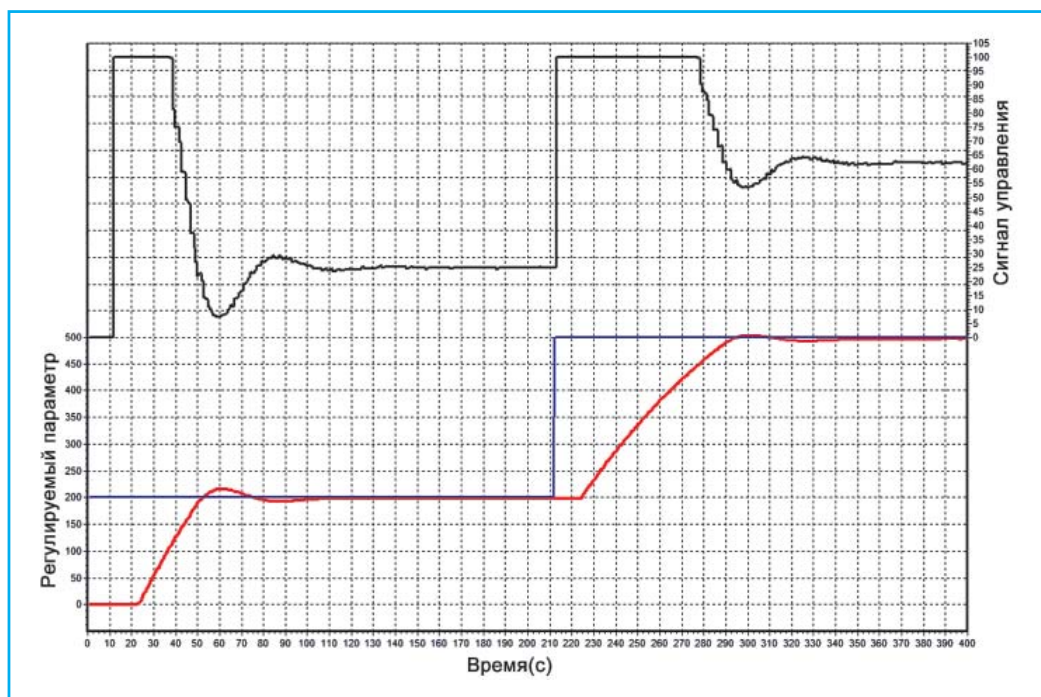


Рис. 9. Переходные процессы в контуре с регулятором Сенсорика:

- перерегулирование 6 %,
- два небольших реверса ИУ (5 и 20 %).

Итог: изменение характеристик ОУ привело к небольшому перерегулированию допустимому для большинства промышленных объектов; регулятор точно поддерживает заданный уровень параметра; контур полностью исправен; регулятор может быть использован с ОУ, параметры которых существенно изменяются в процессе эксплуатации.

Таблица 1

Итоговая таблица сравнения регулятора Сенсорика и стандартного регулятора

Характеристика	Регулятор		Резюме
	Сенсорика	Стандартный	
Время выхода на режим	<i>меньше</i> (рис. 7), близко к минимально возможному	<i>больше</i> (рис. 6) за счет перерегулирования (перелета через уставку)	Малое время выхода обеспечивает раннее начало технологического процесса, отсутствие перерегулирования – возможность работы на объектах, где выход регулируемого параметра за уставку недопустим или ухудшает качество продукции
Перерегулирование	<i>отсутствует</i> или <i>малое</i> (на объектах со сложной динамикой) (рис. 7)	<i>высокое</i> – до 20 % от уставки (рис. 6)	Малое количество реверсов существенно снижает износ элементов механических исполнительных механизмов
Динамика сигнала управления и как следствие исполнительных механизмов	<i>плавная, реверсы</i> (смена направления изменения) <i>отсутствуют</i> или их количество <i>мало</i> (на объектах со сложной динамикой) (рис. 7)	<i>колебательная</i> , т. е. с большим количеством реверсов (рис. 6)	Малое количество реверсов существенно снижает износ элементов механических исполнительных механизмов
Устойчивость контура регулирования к изменению параметров	<i>высокая</i> ; на примере системы (рис. 8). После изменения транспортного запаздывания в 2 раза появилось небольшое перерегулирование, потребовалось 2 реверса исполнительного механизма, контур вошел в установившийся режим с ошибкой 0	<i>низкая</i> ; на примере системы (рис. 9). После изменения транспортного запаздывания в 2 раза перерегулирование увеличилось в 2,5 раза, контур не вошел в установившийся режим (вошел в автоколебательный режим с размахом в 15 %)	Высокая устойчивость позволяет использовать регулятор в контурах, где параметры объекта изменяются вследствие разного количества загружаемого сырья, изменения питающего напряжения, напора и т. д.

Таблица 2

Основные технические характеристики регуляторов серии TR 100

Характеристики	TR101	TR102	TR103П	TR106П
1	2	3	4	5
Законы регулирования	ON/OFF, П, ПИ, ПДД, ПИД			
Количество каналов регулирования	1	2	2	4
Количество универсальных входов	1	2	3	6

- TR103П, TR106П – многоканальные программируемые регуляторы с графическим дисплеем.

Основные характеристики данных приборов приведены в таблице 2.

Регуляторы серии TR100 сертифицированы в качестве средства измерения (СИ), свидетельство № 40336, Госреестр № 44808-10.

НПФ “Сенсорика” бесплатно предоставляет регуляторы TR100 в опытную эксплуатацию сроком на 3 месяца.

Таблица 2 (продолжение)

1	2	3	4	5
Входные сигналы / подключаемые датчики	ТСП, ТСМ, ТСН, ТВР, ТПР, ТПП, ТХК, ТХА, ТЖК, ТНН, 0...100 мА, 0...1 В, 0...5 мА, 0...20мА, 4...20 мА			
Количество аналоговых выходов (max)	2	2	2	4
Количество релейных выходов (max)	2	2	4	8
Количество дискретных входов управления (max)	1	1	3	4
Основная погрешность измерения, %	0,25	0,25	0,1	0,1
Автонастройка ПИД регулятора	+	+	+	+
Количество источников питания датчиков	1	1	3	4
Интерфейсы: RS-232/RS-485	+	+	+	+
Ethernet	-	-	+	+
USB	-	-	+	+
Встроенный архив	-	-	+	+
Программный регулятор	-	-	+	+
Математические каналы	-	+	+	+
Цветной графический дисплей 6,0"	-	-	+	+
Межповерочный интервал, г	2	2	2	2
Габаритные размеры, мм	96'96'110		165'144'250	
Гарантийный срок, г	2	2	2	2

Список литературы

1. Денисенко В.В. ПИД регуляторы: принципы построения и модификации // *Современные технологии автоматизации*. 2006. № 4. С. 66–74.
2. Денисенко В.В. ПИД регуляторы: принципы построения и модификации // *Современные технологии автоматизации*. 2007. № 1. С. 78–88.
3. Денисенко В.В. ПИД регуляторы: вопросы реализации модификации // *Современные технологии автоматизации*. 2006, № 4. С. 86–97.
4. Денисенко В.В. ПИД регуляторы: вопросы реализации модификации // *Современные технологии автоматизации*. 2008. № 1. С. 86–99.
5. Chien K.L., Hrones J.A., Reswick J.B. On automatic control of generalized passive systems // *Trans. ASME*. 1952. Vol. 74, pp. 175–185.
6. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // *Trans. ASME*. 1942. Vol. 64, pp. 759–768.
7. Изерман Р. *Цифровые системы управления*. М.: Мир, 1984. 541 с.
8. Astrom K.J. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. Ed.: K.J. Astrom, T. Hagglund. NC: ISA, 1995. 408 p.

References

1. Denisenko V.V. PID regulatory: printsipy postroeniya i modifikatsii [PID controllers: principles of

construction and modification]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern automation technology]. 2006, no. 4, pp. 66–74.

2. Denisenko V.V. PID regulatory: printsipy postroeniya i modifikatsii [PID controllers: principles of construction and modification]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern automation technology]. 2007, no 1, pp. 78–88.
3. Denisenko V.V. PID regulatory: voprosy realizatsii modifikatsii [PID controllers: questions of realization of the modification]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern automation technology]. 2006, no. 4, pp. 86–97.
4. Denisenko V.V. PID regulatory: voprosy realizatsii modifikatsii [PID controllers: questions of realization of the modification]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern automation technology]. 2008, no. 1, pp. 86–99.
5. Chien K.L., Hrones J.A., Reswick J.B. On automatic control of generalized passive systems. *Trans. ASME*. 1952. Vol. 74, pp. 175–185.
6. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. *Trans. ASME*. 1942. Vol. 64, pp. 759–768.
7. Izerman R. *Tsifrovye sistemy upravleniya* [Digital control systems]. M.: Mir [Moscow: Publishing House “World”]. 1984. 541 p.
8. Astrom K.J. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. Ed.: K.J. Astrom, T. Hagglund. NC: ISA, 1995. 408 p.

Информация об авторах

Кутрубас Владимир Александрович, ведущий инженер-программист
 Email: vladimirus@sensorika.ru
Сычева Елена Евгеньевна, инженер
 Email: mail@sensorika.ru
 ООО НПФ “Сенсорика”
 620075, г. Екатеринбург, Российская Федерация, ул. Мамина-Сибиряка, 145

Information about the authors

Kutrubas Vladimir Aleksandrovich, Senior Software Engineer
 Email: vladimirus@sensorika.ru
Sycheva Elena Evgenevna, Engineer
 Email: mail@sensorika.ru
 LLC SPF “Sensorika”
 620075, Ekaterinburg, Russian Federation, str. Mamina-Sibiryaka, 145