

Сравнительный анализ нелинейного и линейного ПИД-закона регулирования контуров стабилизации

Сухорукова И. Г.; Оробей И. О.; Гринюк Д. А.

Кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники

Белорусский государственный технологический университет

Минск, Республика Беларусь

e-mail: hryniuk@tut.by

Аннотация — Проведен сравнительный анализ нелинейного ПИД-регулятора. Путем численного моделирования в MATLAB показано уменьшение влияния интегрального насыщения на процесс регулирования и повышение запаса устойчивости контуров регулирования по сравнению с линейным регулятором. Качество регулирования оценивалось по интегральному квадратичному отклонению, величине перерегулирования, времени переходного процесса. Доказана возможность уменьшения интегральной ошибки с помощью отключения интегральной составляющей закона регулирования.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, MATLAB, интегральное насыщение, устойчивость

I. ВВЕДЕНИЕ

Интегральное насыщение (integral windup) наблюдается, когда ПИ- или ПИД-регулятор в течение длительного времени должен компенсировать ошибку, лежащую за пределами диапазона управляемой переменной. Интегральное насыщение (ИН) является результатом нелинейностей, связанных с ограничением выходного управляющего воздействия, и может никогда не наблюдаться в действительно линейной системе.

Один из возможных способов ограничения влияния интегральной части заключается в условном интегрировании, которое состоит в следующем: при больших значениях модуля ошибки интегральную часть регулятора отключают, оставляя только пропорциональную составляющую [1].

Несмотря на замену аналоговых средств регулирования цифровыми регуляторами, алгоритм уменьшения интегрального насыщения практически не претерпел изменения [1–5]. Обычным стало наличие ограничителя интегрального насыщения в современных технических средствах регулирования: от многофункциональных контроллеров фирмы Siemens, Omron, Allen-Bradley до простейших одноконтурных регуляторов типа «МЕТАКОН» Modicon Micro, ОВЕН ТРМ101 и др.

II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью численного исследования являлось определение наиболее эффективных решений по устранению интегрального насыщения.

Настройки регулятора определялись для объектов с передаточными характеристиками

$$W(p) = \frac{1}{(1,718p + 1)(0,582p + 1)} \exp(-\tau p); \quad (1)$$

$$W(p) = \frac{1}{p^2 + 2,3p + 1} \exp(-\tau p). \quad (2)$$

Величину запаздывания варьировали в ходе моделирования по ряду [4,3; 1,5; 0,25; 0].

Простейшей реализацией алгоритма по уменьшению ИН является отключение интегральной

составляющей при некотором пороговом значении ошибки, определение которого чаще всего является нетривиальной задачей для нелинейных объектов. Исключение составляет случай, когда возможен вариант обратной связи между регулятором и исполнительным механизмом, который формирует ограничение на управляющие воздействие.

Настройки ПИ-регулятора выбирались по критерию минимизации интегрального квадратичного отклонения (ИКО) в процессе моделирования в системе Matlab.

В электронной технике широкое применение нашли логарифмические усилители, которые обладают рядом полезных свойств. Логарифмическая функция при некоторых условиях может уменьшить ИН. Для проверки этой гипотезы произведена модификация классического ПИ-регулятора путем включения нелинейного блока перед подачей сигнала рассогласования на интегратор со следующей характеристикой:

$$\mu = \text{sign}(err) \ln((1 + \alpha|err|) - (1 + \alpha)), \quad (3)$$

где α – коэффициент кривизны характеристики, который позволяет варьировать статическую характеристику нелинейного блока.

Исследования ряда других нелинейных характеристик ($\mu = \text{sign}(err) \sqrt{|err|}$, $\mu = \text{arctg}(err)$ и т.д.) показали, что результаты уступают системе с логарифмической характеристикой (3).

На заключительном этапе исследований была произведена оценка изменения запаса по устойчивости путем изменения коэффициентов усиления объектов (1) и (2) до появления автоколебаний.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

Моделирование алгоритма отключения интегральной составляющей показало, что отключение интегральной составляющей для данного типа линейных объектов не приводит к уменьшению интегрального отклонения (рис.1). Только для объектов с большим по отношению к постоянной времени запаздыванием наблюдаются минимальные улучшения по сравнению с классическим ПИ-регулятором. При малых значениях $ErrLimit$ можно наблюдать возникновение автоколебаний. Отключение ИН способствует существенному снижению перерегулирования A_1 , что особенно характерно для объектов с запаздыванием, сравнимым с постоянной времени.

В оценке времени регулирования t_p возникли нюансы, связанные с ошибкой, время установления которой следует считать временем окончания переходного процесса. При оценке по уровню 5 %-ного отклонения чаще всего наблюдается уменьшение t_p как следствие уменьшения перерегулирования, при 3 %-ном – увеличение по причине затягивания переходного процесса и склонности к автоколебаниям.

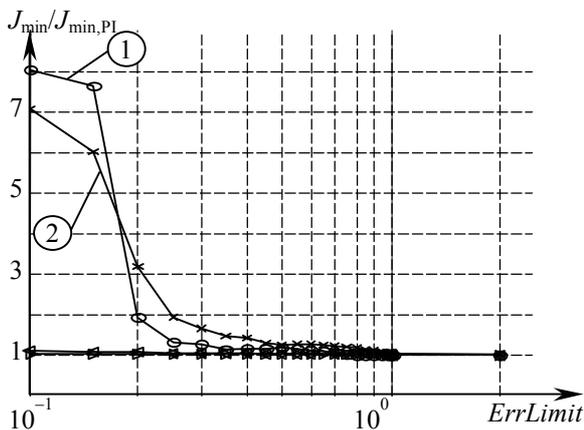


Рис. 1. Зависимость относительного изменения ИКО $J_{\min}/J_{\min,PI}$ от уровня порогового отключения интегральной составляющей:
1 – $\tau = 4,3$ с; 2 – $\tau = 1,5$ с; 3 – $\tau = 0,25$ с; 4 – $\tau = 0$

Сравнительный анализ линейного и нелинейного регулятора с характеристикой (3) показал, что введение нелинейного элемента не уменьшает величину интегрального квадратичного отклонения, но может являться эффективным для снижения величины перерегулирования. Потенциальные возможности этого решения выше, чем у простого отключения интегральной составляющей по величине ошибки. Как в предыдущем случае существует оптимальное пороговое значение, так и при использовании нелинейного элемента существует значение коэффициента кривизны α с максимальным эффектом. По расположению минимумов перерегулирования можно сделать вывод о слабом влиянии динамических характеристик, в частности величины запаздывания, на оптимальное значение α . В нашем случае оно находится в диапазоне от 1,25...3. Время переходного процесса с введением нелинейного блока несколько увеличивалось, однако увеличение незначительно, в особенности в области оптимального значения α . Увеличение значения интегрального квадратичного отклонения в диапазоне оптимальных значений α также незначительно.

Переходные процессы систем регулирования с классическим ПИ-регулятором, отключением интегральной составляющей и нелинейным логарифмическим блоком приведены на рис. 2. На графике отчетливо проявляется склонность систем с отключением интегральной составляющей к автоколебаниям. Декремент затухания для такой системы можно улучшить, однако это повлечет за собой затягивание переходного процесса с одновременным увеличением времени регулирования и интегрального квадратичного отклонения.

Сравнение по запасу устойчивости контуров с линейным и нелинейным регуляторами показало явное преимущество регулятора с подачей сигнала рассогласования на интегратор с характеристикой (3).

Следует отметить, что при выборе настроек регуляторов, предназначенных для снижения интегрального насыщения, следует использовать комплексный критерий, т. е. минимизировать функционал с учетом времени регулирования и перерегулирования. При таком подходе регулятор с логарифмическим нелинейным блоком является предпочтительнее, в особенности для систем, в

которых трудно осуществить связь регулятора с положением регулирующего органа.

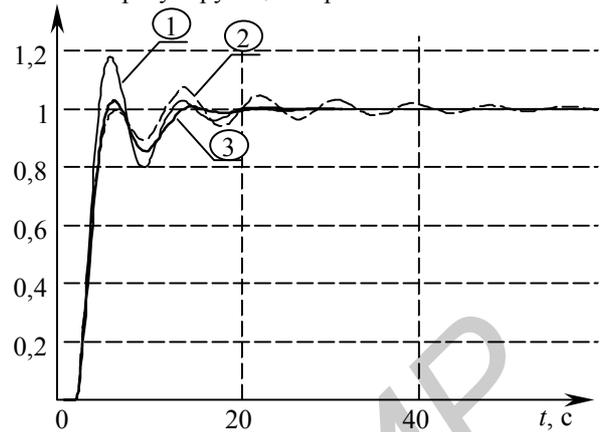


Рис. 2. Переходные процессы при оптимальных значениях настроек регуляторов: 1 – классический; 2 – с отключением интегральной составляющей; 3 – с нелинейным блоком

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Полученные результаты свидетельствуют, что использование условного интегрирования дает положительный эффект в борьбе с интегральным насыщением только по перерегулированию. Особенно это характерно для контуров регулирования с хорошо подобранными настройками регулятора. В случае «мягких» настроек эффективность ситуационного отключения интегральной составляющей повышается. Предложенное нелинейное преобразование ошибки интегральной составляющей обладает большими возможностями по обеспечению качественных переходных процессов и защиты от интегрального насыщения. Кроме этого предложенный нелинейный регулятор повышает устойчивость. При регулировании технологических объектов с помощью современных программируемых логических контроллеров реализация предложенного решения не вызовет затруднения.

- [1] Олссон Г., Пиани Дж. Цифровые системы автоматизации и управления. — СПб.: Невский проспект, 2001. — 557 с.
- [2] Пат. 5,570,282 США МКИ G05B 013/02. Multivariable nonlinear process controller P.D. Hansen, P.C. Badavas; The Foxboro Company. — № 333161; Заявл. 29.10.1996; Оpubл. 01.11.1994; НКИ 700/41. — 15 с.
- [3] Пат. 5,570,282 США МКИ G05B 005/01. Positional control method and system utilizing same R.A. Morse; D.P. Chia; K.A. Stoddard; GMF Robotics Corporation. — № 865763; Заявл. 23.02.1988; Оpubл. 22.05.1986; НКИ 318/616. — 8 с.
- [4] Пат. 2120655 РФ МКИ G05B011/36. Пропорционально-интегральный регулятор с ограничениями выходных сигналов/ Говоров А.А., Баженов А.В., Говоров С.А. — № 98102222; Заявл. 19.08.1997; Оpubл. 11.01.1995. — 5 с.
- [5] Пат. 2120654 РФ МКИ G05B011/36. Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор с ограничениями выходных сигналов/ Говоров А.А., Баженов А.В., Говоров С.А. — № 98101674; Заявл. 19.08.1997; Оpubл. 11.01.1995. — 6 с.