

Д.А. Гринюк, канд. техн. наук; И.О. Оробей, доцент; И.Ф. Кузьмицкий, доцент

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УМЕНЬШЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО НАСЫЩЕНИЯ

The article is devoted to problems of search and analysis of algorithms of reduction of integral windup at use PID of the laws of regulation. Quality is analyzed of the decisions was checked with the help of numerical modeling in the appendix Simulink of system MATLAB. The quality of regulation was estimated on an integrated square-law deviation, size overshoot, time of transient. The conclusion about insignificant opportunities of reduction of an integrated mistake with the help of switching-off of an integrated component of the law of regulation is made. The reduction of size overshoot was observed.

Интегральное насыщение (integral windup) представляет собой эффект, который наблюдается, когда ПИ- или ПИД-регулятор в течение длительного времени должен компенсировать ошибку, лежащую за пределами диапазона управляемой переменной. При сохранении ошибкой управления одного знака в течение длительного времени становится чрезмерно большой величина интегральной составляющей ПИД-регулятора. Причиной этого могут быть нелинейности, в частности ограничения в исполнительном механизме, определенные настройки регулятора и т.д. Поскольку интегральная часть принимает необходимое стационарное значение лишь через некоторое время после изменения знака ошибки, то интегральное насыщение может привести к большому перерегулированию и затягиванию переходного процесса. 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. Интегральная составляющая включается только для устранения небольшой статической ошибки. В аналоговых регуляторах это реализовывалось отключением входа интегратора от блока определения рассогласования или включением ограничителя в структуру интегратора [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.

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

Настройки регулятора определялись для объекта с передаточной характеристикой

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

или

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

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 в большинстве случаев является нетривиальной задачей для нелинейных объектов. Исключение составляет случай, когда возможен вариант обратной связи между регулятором и исполнительным механизмом, который формирует ограничение на управляющее воздействие.

Настройки ПИ-регулятора выбирались по критерию минимизации интегрального квадратичного отклонения (ИКО) в процессе моделирования в системе Matlab (Simulink). По данным, представленным на рис. 1, в координатах квадрату отклонения для классического ПИ-регулятора ( $J_{\text{min}}/J_{\text{min,PI}}$ ) в зависимости от порогового значения ( $ErrLimit$ ), можно сделать следующий вывод. Отключение интегральной составляющей для линейного объекта не приводит к уменьшению интегрального отклонения, а скорее наоборот. Только для объектов с большим запаздыванием по отношению к постоянной времени наблюдаются минимальные улучшения в сравнении с классическим ПИ-регулятором. При малых значениях  $ErrLimit$  можно наблюдать возникновение автоколебаний. Отключение ИН в то же время способствует существенному снижению перерегулирования  $A_1$  (рис. 2), что характерно в особенности для объектов с запаздыванием, сравнимым с постоянной времени.

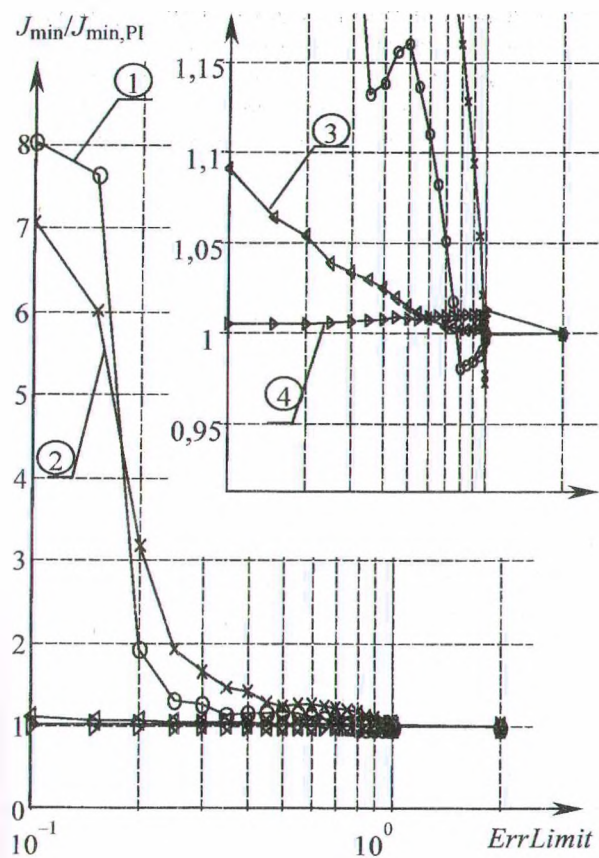


Рис. 1. Зависимость относительного изменения ИКО  $J_{\min}/J_{\min,PI}$  от уровня порогового отклонения интегральной составляющей: 1 -  $\tau = 4,3$  с; 2 -  $\tau = 1,5$  с; 3 -  $\tau = 0,25$  с; 4 -  $\tau = 0$

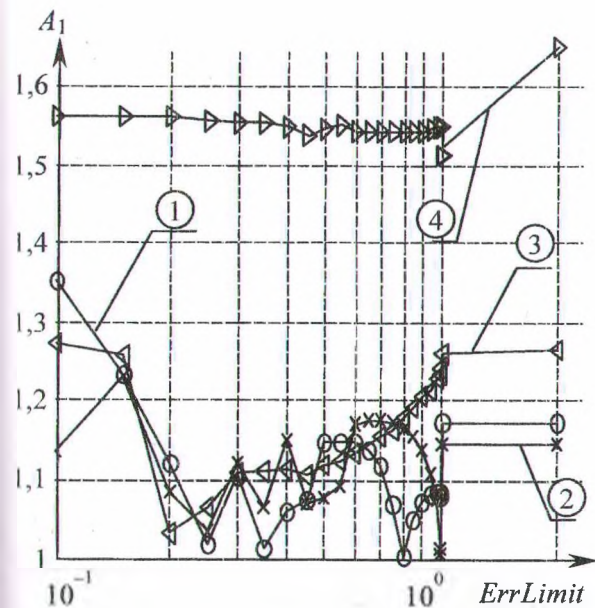


Рис. 2. Зависимость перегулирования от уровня порогового отклонения интегральной составляющей: 1 -  $\tau = 4,3$  с; 2 -  $\tau = 1,5$  с; 3 -  $\tau = 0,25$  с; 4 -  $\tau = 0$

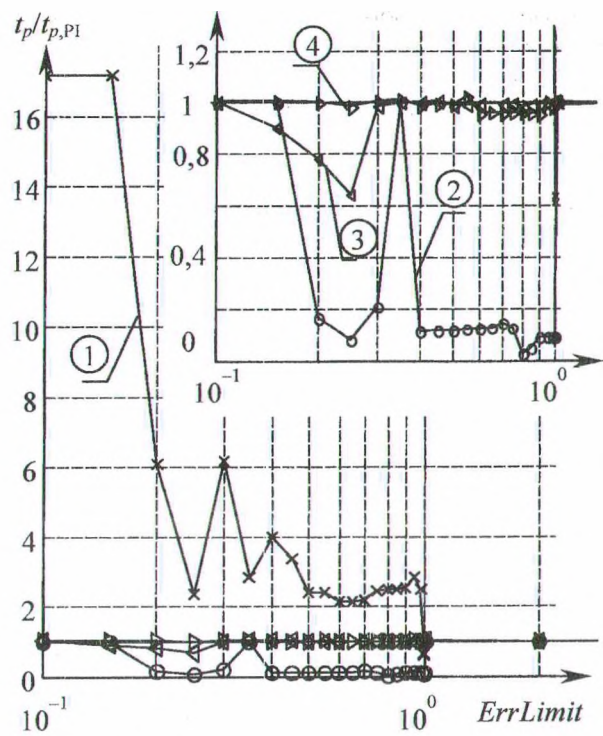


Рис. 3. Зависимость времени переходного процесса по 5 %-ной оценке от уровня порогового отклонения интегральной составляющей:

1 -  $\tau = 4,3$  с; 2 -  $\tau = 1,5$  с;  
3 -  $\tau = 0,25$  с; 4 -  $\tau = 0$

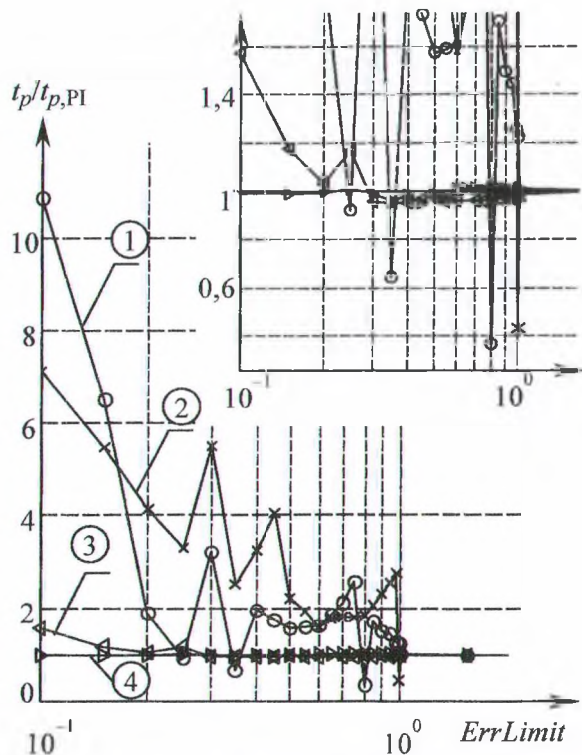


Рис. 4. Зависимость времени переходного процесса по 3 %-ной оценке от уровня порогового отклонения интегральной составляющей: 1 -  $\tau = 4,3$  с; 2 -  $\tau = 1,5$  с; 3 -  $\tau = 0,25$  с; 4 -  $\tau = 0$

В оценке времени регулирования  $t_p$  возникли нюансы, связанные с ошибкой, время установления которой следует считать временем окончания переходного процесса. Если время переходного процесса определять по уровню 5 %-ного отклонения, то чаще всего наблюдается уменьшение  $t_p$  (рис. 3) как следствие уменьшения перерегулирования, при 3 %-ном – наоборот, увеличение по причине затягивания переходного процесса и склонности к автоколебаниям (рис. 4).

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

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

где  $\alpha$  – коэффициент кривизны характеристики.

Коэффициент  $\alpha$  позволял варьировать статической характеристикой нелинейного блока (рис. 5).

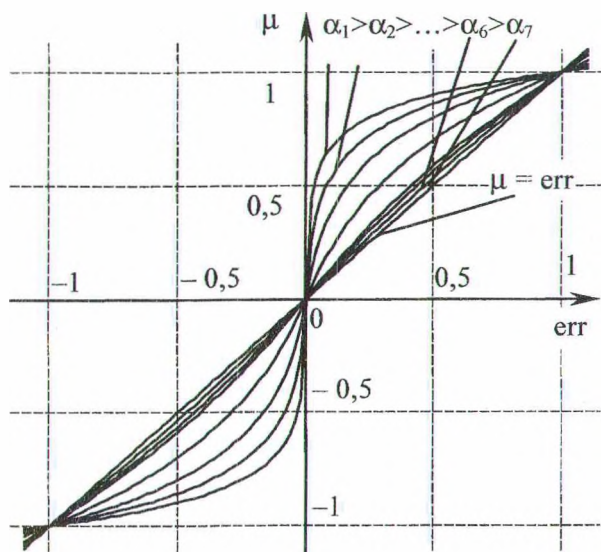


Рис. 5. Статические характеристики нелинейного блока при  $\alpha = [1000, 125, 25, 5, 1, 0,85, 0,02]$

Результаты моделирования представлены на рис. 6–8. На их основе можно сделать ряд выводов. Введение нелинейного элемента не позволяет снизить величину интегрального квадратичного отклонения, но может являться эффективным решением по снижению величины перерегулирования. При этом потен-

циальные возможности этого решения гораздо выше, чем простое отключение интегрирующей составляющей по величине ошибки. Как в предыдущем случае существует оптимальное значение порогового значения, так и при использовании нелинейного элемента существует значение коэффициента кривизны с максимальным эффектом. По расположению минимумов перерегулирования можно сделать вывод о слабом влиянии динамических характеристик, и в частности величины запаздывания, на оптимальное значение  $\alpha$ . 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  $\alpha$ . Увеличение значения интегрального квадратичного отклонения в диапазоне оптимальных значений  $\alpha$  также незначительно.

Переходные процессы систем регулирования с классическим ПИ-регулятором, отключением интегральной составляющей и нелинейным блоком приведены на рис. 9. 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.

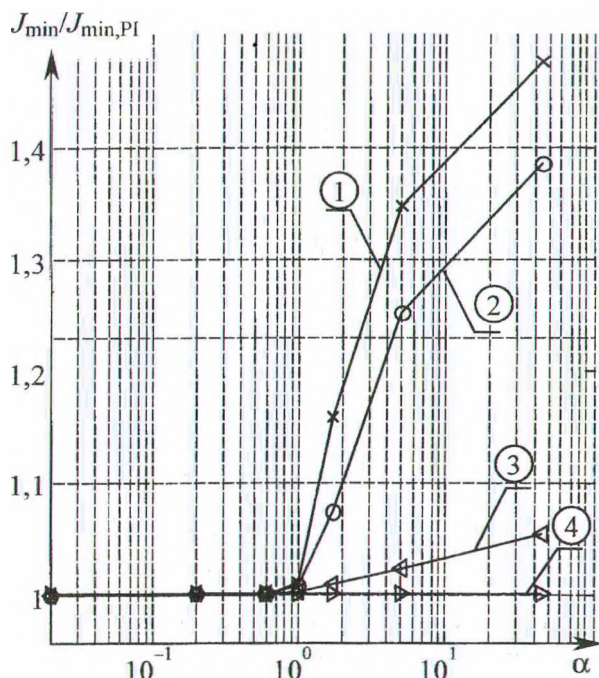


Рис. 6. Зависимость относительного изменения ИКО  $J_{\min}/J_{\min,PI}$  от коэффициента кривизны характеристики: 1 –  $\tau = 4,3$  с; 2 –  $\tau = 1,5$  с; 3 –  $\tau = 0,25$  с; 4 –  $\tau = 0$

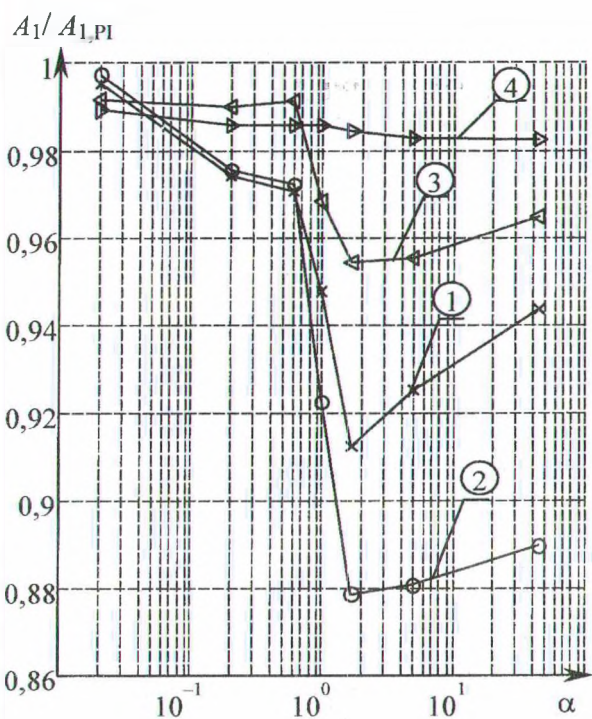


Рис. 7. Зависимость перерегулирования от коэффициента кривизны характеристики:  
 1 -  $\tau = 4,3$  с; 2 -  $\tau = 1,5$  с; 3 -  $\tau = 0,25$  с; 4 -  $\tau = 0$

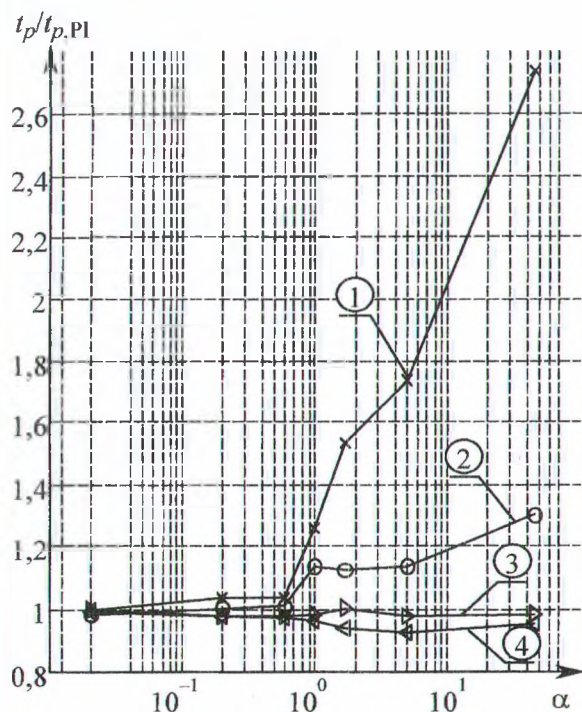


Рис. 8. Зависимость времени переходного процесса по 3 %-ной оценке от коэффициента кривизны характеристики:  
 1 -  $\tau = 4,3$  с; 2 -  $\tau = 1,5$  с; 3 -  $\tau = 0,25$  с; 4 -  $\tau = 0$

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.

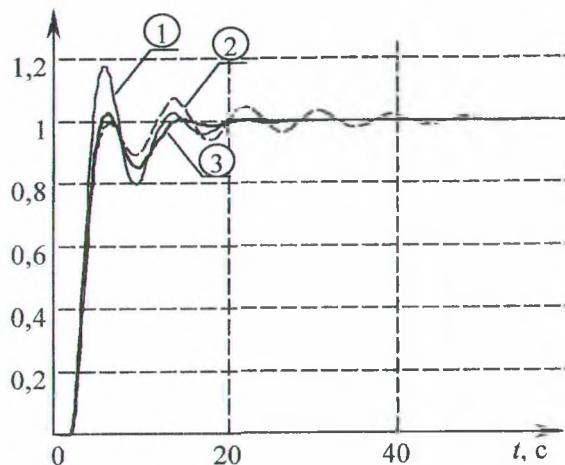


Рис. 9. Переходные процессы при оптимальных значениях настроек регуляторов:  
 1 - классический; 2 - с отключением интегральной составляющей; 3 - с нелинейным блоком

### Литература

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.