

ОБЗОР РАБОТЫ ПИ- и ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ В РЕЖИМАХ ИНТЕГРАЛЬНОГО НАСЫЩЕНИЯ

А.М. Шубладзе, С.В. Гуляев (ИПУ РАН), С.И. Кузнецов (ОАО "НИИТЕПЛОПРИБОР"),
В.А. Малахов, В.Р. Ольшванг (ИПУ РАН)

Представлен обзор работы ПИ и ПИД-регуляторов в режиме интегрального насыщения, возникающего при наличии ограничений на выходе регулятора. Приведены различные алгоритмы, устраняющие эту проблему, и сравнительные результаты их действия.

Введение

При работе систем промышленной автоматики во многих случаях возникают режимы работы, в которых ПИ и ПИД-регуляторы начинают работать в нелинейных режимах. Эффективность их использования может значительно уменьшаться, если на выходной сигнал регулятора накладываются ограничения. Это может происходить, когда расчетный выход регулятора выходит за пределы диапазона реального выхода исполнительного механизма. Если ПИД-регулятор в течение длительного времени должен компенсировать ошибку, сохраняющую свой знак, то величина интегральной составляющей ПИД-регулятора становится очень большой, не производя при этом реального воздействия на регулируемую величину. Этот эффект называется интегральным насыщением. Интегральное насыщение является результатом нелинейностей в системе, связанных с ограничением выходного управления. Интегральное насыщение может возникнуть при воздействии на объект большого возмущения, а также при изменении задания на большую величину, в частности, при начальном пуске и выходе регулируемой величины на заданный рабочий уровень. Отрицательный эффект интегрального насыщения вызывает ухудшение качества регулирования, то есть увеличение времени регулирования и большое перерегулирование. При некоторых усло-

виях интегральное насыщение может привести к возникновению автоколебаний, даже если в линейной зоне система управления обеспечивает высокое качество регулирования.

Интегральное насыщение

Чтобы проиллюстрировать эффект интегрального насыщения рассмотрим систему, представленную на рис. 1.

ПИД-регулятор выберем в форме, исключаяющей реакцию дифференциальной составляющей на скачок по заданию. Передаточная функция ПИД-регулятора:

$$G_c(s) = K_p \left(E(s) + \frac{1}{T_i s} E(s) - \frac{T_d s}{(T_d / N)s + 1} Y(s) \right), \quad (1)$$

где K_p — коэффициент пропорциональности, T_i и T_d — время интегрирования и дифференцирования соответственно, N — выбирается в диапазоне 5...20 ед.

Поскольку эффект интегрального насыщения наиболее сильно проявляется у объектов небольших порядков, у которых время запаздывания по отношению к динамике относительно мало, передаточную функцию объекта примем в виде:

$$G_p(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls}. \quad (2)$$

На рис. 2 показана реакция системы (1), (2) на единичный скачок. Здесь $K = 1$, $T = 1$, $L = 0,2$, настройки регулятора, выбранные в соответствии с методом автоколебаний Циглера-Никольса: $K_p = 3,03$, $T_i = 0,41$ и $T_d = 0,1$, $N = 10$, ограничения управления $u_{min} = 0$ и $u_{max} = 1,5$. Черная линия — выход объекта, светло рыжая линия — управление с учетом ограничения, серая линия — интегральная составляющая.

Из графика видно, что управление продолжает длительное время находиться на максимальном уровне из-за большой величины интегральной составляющей, несмотря на то, что ошибка поменяла знак в момент $t = 1,3$ с, это вызывает значительное перерегулирование в течение большого времени.

Самым простым и интуитивно понятным способом избавления от этого нежелательного эффекта представляется такая организация работы регулятора, при которой управление не достигает граничных значений. Этого можно добиться ограничением величины или скорости изменения задания, а также выбором "медленных" настроек регулятора. Однако такой способ требует дополнительных усилий при синтезе регулятора и может значительно снизить качество его функционирования. Поэтому в настоящее время раз-

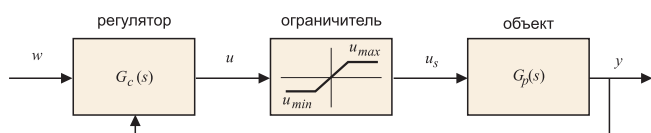


Рис. 1. Система управления, где w — задание, u — вычисленный выход регулятора, u_{max} и u_{min} — ограничения выхода, u_s — выход регулятора с учетом ограничения, e — ошибка, y — регулируемая величина, y_0 — начальное значение выхода объекта, y_1 — конечное значение выхода объекта при изменении задания

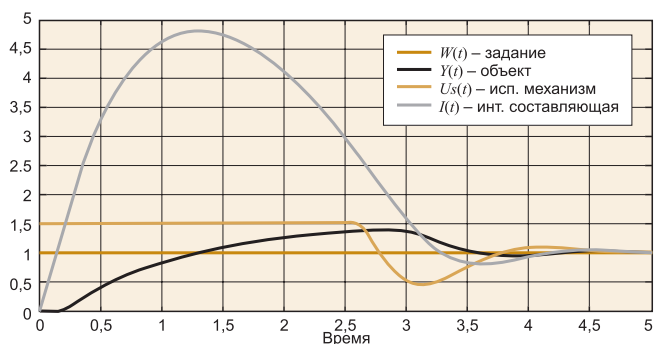


Рис. 2. Реакция системы с ПИД-регулятором на скачок

работаны различные способы устранения эффекта интегрального насыщения [1-5], не допускающие выхода управляющего сигнала на граничные значения и, тем не менее, обеспечивающие удовлетворительное качество переходных процессов. Основная идея этих методов состоит в том, чтобы не допустить нежелательного роста интегральной составляющей при выходе управления из линейной зоны. Эти способы можно разделить на пять основных групп:

1. условное интегрирование (conditional integration – CI);
2. метод обратного счета (back-calculation – BC);
3. метод задания интегральной составляющей (preloading – PR);
4. ПИД-регулятор переменной структуры (variable structure PID – VSPID);
5. комбинированный метод, сочетающий условное интегрирование с методом обратного счета (CI-BC).

Рассмотрим эти методы подробнее.

Условное интегрирование (CI)

При использовании этого метода интегральная составляющая растет только при выполнении некоторых условий, в противном случае она сохраняет свое значение. Ограничения на рост интегральной составляющей могут быть следующими:

- а. интегральная составляющая ограничена заданными величинами;
- б. интегрирование останавливается, когда ошибка становится большой, то есть $|e| > e_{max}$, где e_{max} – заданная величина;
- с. интегрирование останавливается, когда исполнительный механизм достигает ограничения, то есть $u \neq u_s$;
- д. интегрирование останавливается, когда исполнительный механизм достигает ограничения, а знаки ошибки и управления совпадают, то есть $u \neq u_s$ и $e \times u > 0$.

К недостатку первых двух способов, которые чаще всего применяются на начальной стадии процесса при выходе на рабочую точку, относится возможное появление статической ошибки. В первом случае, ограничение интегральной составляющей может помешать выходу регулируемой величины на задание. Во втором случае, выход регулятора может "зависнуть" и остаться на таком значении, при котором ошибка больше порогового значения e_{max} . Поэтому для использования этих методов требуется дополнительный анализ объектов управления, что затрудняет их применение. В третьем и четвертом способе эти проблемы решаются, но четвертый способ значительно предпочтительнее третьего, так как в нем интегральная составляющая может изменяться в сторону, противоположную достигнутому ограничению.

Метод обратного счета (BC)

Этот способ (рис. 3) является альтернативным к методу условного интегрирования. Он сводится к пе-

Законы математики, имеющие какое-либо отношение к реальному миру, ненадежны; а надежные математические законы не имеют отношения к реальному миру.

А. Эйнштейн

ресчету интегральной составляющей регулятора, как только управляющий сигнал выходит за пределы ограничений. Вход интегральной составляющей уменьшается на величину пропорциональную разности между вычисленным значением ПИ- (ПИД-) управления и ограничениями выхода. Вход интеграла:

$$e_i = \frac{K_p}{T_i} e + \frac{1}{T_i} (u_s - u),$$

где T_i – время слежения, которое определяет скорость, с которой уменьшается интегральная составляющая. Обычно для ПИД-регулятора принимают $T_i = \sqrt{T_d T_d}$, или $T_i = T_d$, для ПИ- (ПИД-) регуляторов. Реализуется этот способ введением дополнительной обратной связи, подаваемой на вход интеграла.

Метод задания интегральной составляющей (PR)

В этом методе (рис. 4) также вводится дополнительная обратная связь, управляющая интегральной составляющей. Эта обратная связь включается при выходе вычисленного значения управления на ограничение. При ее включении выход интеграла динамически стремится к заранее определенной величине i_d (далее примем $i_d = 0$). Таким образом, вход интеграла:

$$e_i = \begin{cases} -\alpha(i - i_d), & \text{если } u \neq u_s, \\ \frac{K_p}{T_i} e, & \end{cases}$$

где $\alpha > 0$ настроечный параметр, управляющий скоростью убывания интеграла при выходе управления на ограничение. Недостатком этого метода является необходимость заранее определять настроечные параметры i_d и α . Также нельзя гарантировать, что управление и сойдет с ограничения при стремлении i к i_d .

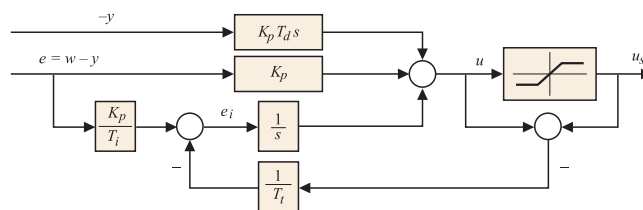


Рис. 3. Структура алгоритма BC

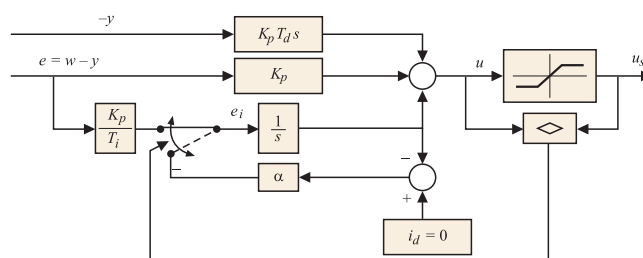


Рис. 4. Структура алгоритма PR

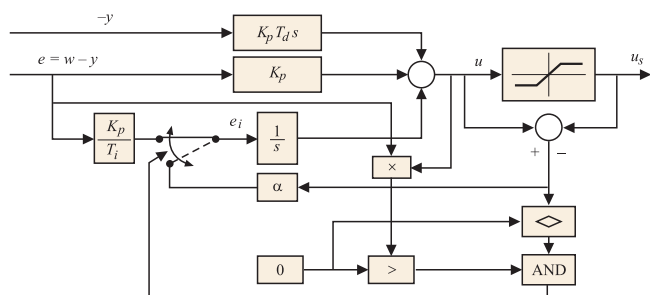


Рис. 5. Структура алгоритма VSPID

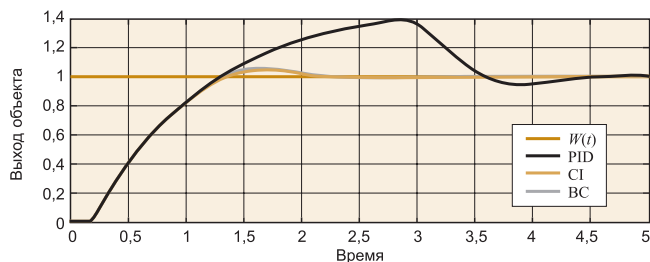


Рис. 7. Реакция системы с CI, BC алгоритмами на скачок

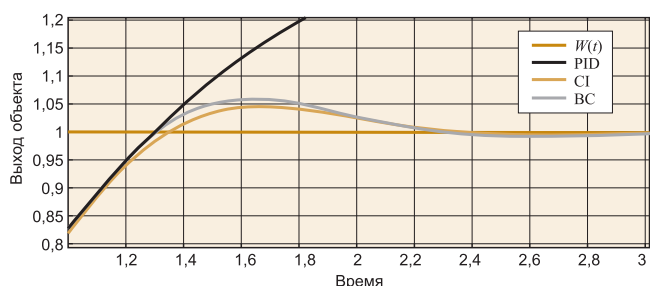


Рис. 8. Фрагмент из рис. 7

ПИД-регулятор переменной структуры (VSPID)

Этот метод (рис. 5), близкий к методу обратного счета, отличается тем, что пересчет интегральной составляющей, то есть включение обратной связи происходит при выполнении некоторых условий. При выходе вычисленного управления u на ограничения, интегральная составляющая динамически изменяется так, чтобы u оставалось вблизи граничных значений u_{max} или u_{min} . Вход интеграла для этого метода можно записать:

$$e_i = \begin{cases} -\alpha(u - u_s), & \text{если } u \neq u_s \text{ и } e(u - \bar{u}) > 0, \\ \frac{K_p}{T_i} e, & \end{cases}$$

где $\bar{u} = (u_{max} + u_{min})/2$, α – настроечный параметр, выбираемый так, чтобы u быстро смещалось к ближайшему граничному значению интервала $[u_{min}, u_{max}]$.

Из схемы алгоритма видно, что в линейной зоне поведение VSPID алгоритма совпадает с поведением обычного ПИД-регулятора, поэтому использование этого способа не вызывает затруднений на практике. Настойка параметра α также не вызывает затруднения, обычно α выбирается так, чтобы динамика обратной связи в интегральном контуре была в 2...5 раз быстрее, чем динамика замкнутой системы управле-

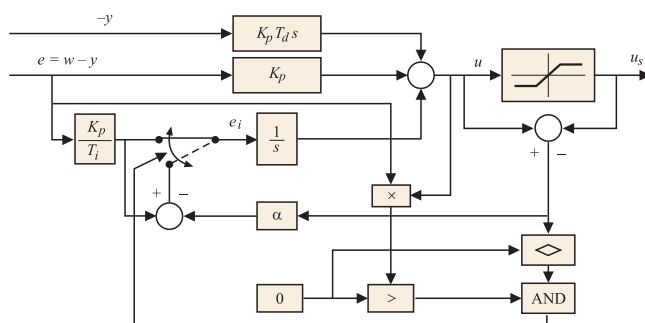


Рис. 6. Структура алгоритма CI-BC

Табл. 1. Показатели качества регулирования

Регулятор	Время нарастания, с	Перерегулирование, %	Время стабилизации, с
PID	0,846	38,9	4,005
CI	0,859	4,2	1,222
BC	0,847	5,6	1,79
PR	0,859	4,4	1,222
VSPID	0,954	4,3	1,327
COMB	0,847	5,6	1,791

ния. Поскольку управление u в режиме ограничения находится близко к границам линейной зоны, VSPID регулятор достаточно быстро переходит в линейный режим при сходе управления с ограничений.

Комбинированный метод (CI-BC)

В этом подходе (рис. 6), аналогично VSPID, к методу обратного счета добавляются некоторые условия из способа условного интегрирования. Вычисления в линии обратной связи для блока интегрирования выполняются, если управляющий сигнал выходит за пределы ограничений, знаки ошибки и управления совпадают. Но в отличие от VSPID во всех режимах ошибка e подается на вход интеграла. Это можно записать так:

$$e_i = \begin{cases} \frac{K_p}{T_i} e - \alpha(u - u_s), & \text{если } u \neq u_s \text{ и } e(u - \bar{u}) > 0, \\ \frac{K_p}{T_i} e. & \end{cases}$$

Настроечные параметры $\bar{u}$ и α выбираются аналогично VSPID.

Результаты моделирования

Чтобы проиллюстрировать эффективность рассмотренных методов приведем результаты моделирования их работы.

Пусть передаточная функция объекта:

$$G_p(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.2s}.$$

Настройки регулятора $K_p = 3,03$, $T_i = 0,41$ и $T_d = 0,1$, $N = 10$. В начальный момент времени $t = 0$ скачком с 0 до 1 меняется задание, ограничения регулятора $u_{max} = 1,5$ и $u_{min} = -1,5$. На рис. 7 показана реакция объ-

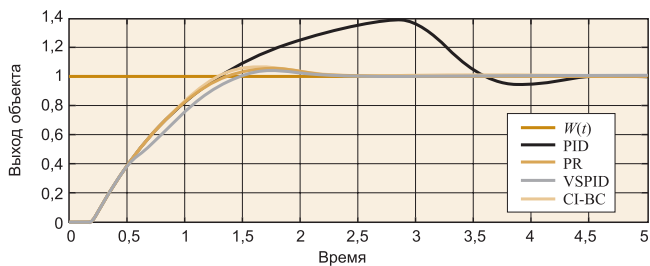


Рис. 9. Реакция системы с PR, VSPID, CI-BC алгоритмами на скачок

екта на скачок управления для методов CI, BC сравнительно с обычным ПИД-регулятором; на рис. 8 — увеличенный фрагмент этих графиков; на рис. 9 — реакция объекта на скачок управления для методов PR, VSPID, CI-BC сравнительно с обычным ПИД-регулятором; на рис. 10 — увеличенный фрагмент этих графиков.

Для оценки качества работы регуляторов приведем оценки таблицы следующих параметров:

- время нарастания — время изменения регулируемой величины 10...90% установившегося значения;
- перерегулирование;
- время стабилизации — время попадания регулируемой величины в 5-процентную трубку от установившегося значения.

Заключение

Из анализа результатов моделирования можно видеть, что все рассматриваемые способы эффективно устраняют проблему интегрального насыщения, незначи-

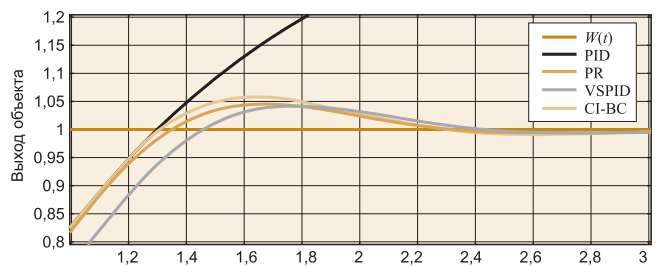


Рис. 10. Фрагмент из рис. 9

тельно отличаясь по результатам. Сделать однозначный выбор в пользу какого-либо способа достаточно трудно. Для произвольных объектов задача выбора наилучшего способа достаточно сложна, так как эффективность каждого способа сильно зависит от вида объекта (порядок объекта, время запаздывания), настроек регулятора и критерия качества регулирования (минимум перерегулирования, минимум времени стабилизации и т.д.).

Список литературы

1. *Astrom, K. J. and T. Hagglund. PID Controllers: Theory, Design and Tuning* ISA Press, Research Triangle Park, USA 1995.
2. *Bohn, C. and D. P. Atherton. An analysis package comparing PID anti-windup strategies. IEEE Control Systems Magazine*, 1995.
3. *Scottedward Hodel, A. and Charles E. Hall, IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2001 Vol. 48, No.2. Visioli, A. *Practical PID control*, Springer verlag, USA, 2006.
4. *Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 1 //Современные технологии автоматизации. 2006. № 2.*

Шубладзе Александр Михайлович — д-р техн. наук, проф. зав. лабораторией,

Гуляев Сергей Викторович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,

Малахов Валерий Александрович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,

Ольшванг Владимир Рафаилович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Кузнецов Сергей Иванович — генеральный директор ФГУП ОАО "НИИТЕПЛОПРИБОР".

Контактный телефон (495) 334- 88-81.

GE Fanuc Intelligent Platforms объявляет о выпуске Proficy™ Change Management 5.8

Компания GE Fanuc Intelligent Platforms объявила о выпуске версии 5.8 известного на рынке программного продукта Proficy™ Change Management. Новая версия предоставляет пользователям возможности повышения рентабельности производства за счет отслеживания изменений в важнейших системах управления производством. Наличие у ПО Web-интерфейса обеспечивает простоту и легкость инсталляции, использования и обслуживания клиента Change Management.

За счет наличия в Proficy Change Management эффективных функций, в число которых входят, в частности, средства обеспечения безопасности, управления версиями, журнал регистрации событий, функции централизованного хранения и резервного копирования и восстановления данных в автоматическом режиме, данное ПО может помочь предприятиям обеспечить безопасную и оптимальную эксплуатацию используемых АСУП.

В состав Proficy Change Management 5.8 входят:

- новый HTML-клиент конечного пользователя с Web-интерфейсом, который является тонким, легким в применении и требует небольших системных ресурсов, что позволяет пользователям экономить время и усилия при инсталляции или обновлении своих клиентов. Он также обеспечивает легкий доступ к проектам на сервере Change Management. Клиент предоставляет

доступ к общим пользовательским функциям типа check out/in (выходной/выходной контроль), open (открытие), version reports (отчет по версиям), compare (сравнение) и др. Новое оформление функций перетаскивания Drag and Drop облегчает создание пользовательского интерфейса для организации проектов и предоставляет пользователям настраиваемый Web-интерфейс;

- новое ядро управления и интерфейс планировщика Scheduler, позволяющий пользователям автоматизировать типичные операции функций резервного копирования и сравнения, которые дают возможность обеспечивать целостность АСУП. Планировщик обеспечивает выполнение надлежащего программного модуля или использование корректной конфигурации в приложении диспетчерского контроля и управления или в ПЛК путем сравнения выполняемой системы с ее эталонной версией;

- новый модуль Schneider ProWORX 32, позволяющий пользователям задавать и контролировать изменения в проектах за счет использования стандартных средств управления версиями, входного/выходного контроля, проверки изменений, равно как и функции сравнения версий или ПЛК по заданному графику или в ручном режиме.

[Http://www.gefanuc.com](http://www.gefanuc.com)