

# ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ В СИСТЕМЕ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г., Арпентий Д. О.  
 Кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники,  
 Белорусский государственный технологический университет  
 Минск, Республика Беларусь  
 E-mail: hryniukda@gmail.com

*Проведено исследование по применению управляемых ограничителей для подавления помех в измерительном канале замкнутых контуров регулирования. Наличие шумов в измерительном канале при управлении технологических процессов затрудняет использование дифференцирования для улучшения динамики, а также способствует увеличению срока эксплуатации исполнительных механизмов систем управления*

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день появилось множество методов для улучшения динамики регулирования, в том числе путем введения в структуру регулирования элементов, которые быстро реагируют на изменения ошибки регулирования. Проблема классического ПИД-регулирования, связанная с сложностью обеспечения высокой скорости реагирования при наличии значительного уровня шума в измерительном канале, становится очевидной [1, 2]. Эта проблема усугубляется цифровым преобразованием аналогового сигнала в технических устройствах регулирования. Для решения проблемы шумов часто используют нелинейные фильтры. Некоторые устройства уже включают встроенный фильтр скользящего среднего и функцию исключения значений с наибольшим отклонением.

### I. ФИЛЬТР НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОГО ОГРАНИЧИТЕЛЯ (ФУО)

Управляемый ограничитель является нелинейным решением, поэтому его эффективность зависит от места в структуре регулирования. Для решения общей задачи шумоподавления ФУО лучше располагать после измерительного преобразователя. Если проблемы связаны с надежной работой исполнительного механизма ограничитель можно установить уже после регулятора.

При использовании классической структуры ПИД-регулятора, когда сигнал ошибки умножается на коэффициент усиления, а только потом поступает на звено дифференцирования или интегрирования, рационально устанавливать ФУО уже после усиления сигнала ошибки. Особенно, если коэффициент усиления регулятора значительно больше 1.

Фильтрацию с помощью управляемого ограничителя лучше производить только для контура обратной связи, так как он может вносить существенные нелинейные искажения в измерительный канал.

Может быть предложено несколько вариантов структур управляемого ограничителя (рис.

1), в которых коэффициент  $a$  формирует некоторое компромиссное значение между уровнем снижения амплитуды помех и временными задержками.

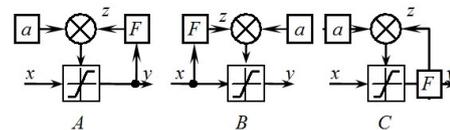


Рис. 1 – Структуры ФУО.  $F$  – сглаживающий фильтр;  $z$  – сигнал после фильтра

Параметр настройки  $z$  может быть как статический так и динамический. В первом случае имеем постоянную величину уровня ограничения функции верхней и нижней границы. Для динамического изменения потребуется определять текущую скорость входной величины. В самом простом случае это может быть фильтр высокой частоты.

### II. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Предложенное решение было опробовано в системе динамического моделирования с помощью структуры, которая представлена на рис. 2. Для комплексной оценки предложенного решения в данной структуре величина запаздывания принимала значения  $\tau = [0, 1 \ 5 \ 15]$ .

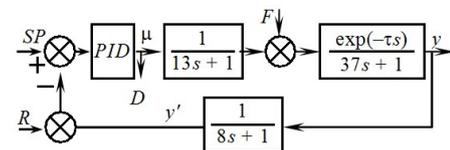


Рис. 2 – Структура объекта исследования.  $y$  – выходной сигнал;  $y'$  – сигнал датчика,  $s$  – оператор передаточной функции в преобразовании Лапласа;  $\mu$  – сигнал после регулятора

Дисперсия создавалась встроенным генератором в Matlab со следующими значениями  $R = [0 \ 0,00003 \ 0,0001 \ 0,0003 \ 0,001 \ 0,003 \ 0,01]$ . Для выбора критерия настройки была произведена настройка данной структуры по различным интегральным критериям [3]. Некоторые варианты

критериев приведены ниже.

$$I_{1-3} = \int_0^{tf} t^N |e(t)| dt \rightarrow \min \quad (1)$$

$$I_4 = \int_0^{tf} (|e(t)| + |\mu(t)|) dt \rightarrow \min \quad (2)$$

$$I_{5-7} = \int_0^{tf} t^N e(t)^N dt \rightarrow \min \quad (3)$$

$$I_8 = \int_0^{tf} (e(t)^2 + \mu(t)^2) dt \rightarrow \min \quad (4)$$

где  $e(t)$  – невязка между сигналом задания  $SP$  и выходной переменной;  $tf$  – время от изменения сигнала задания до окончания переходного процесса;  $N$  – от 0 до 2.

Результат настройки можно видеть на рис. 4, 5. Наличие шума больше влияет на критерии с временным штрафом  $I_2 - I_3$ . Отличие в настройках для квадратичных критериев  $I_5 - I_8$  незначительны.

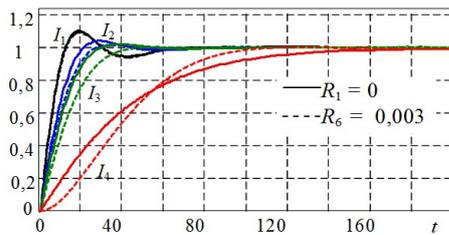


Рис. 3 – Переходные процессы при настройке по критериям  $I_1 - I_4$

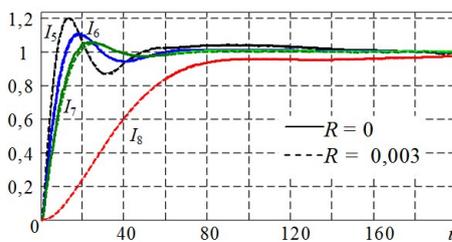


Рис. 4 – Переходные процессы при настройке по критериям  $I_5 - I_8$

Интегральные критерии, которые учитывают отклонение сигнала управления с регулятора фактически исключают дифференциальную составляющую из регулятора. Данные критерии могут быть использованы, когда вопрос надежной работы исполнительных механизмов стоит на первом месте.

Переходной процесс для критерия  $I_3$  соответствует компромиссу между быстродействием, перерегулированием и величиной времени дифференцирования  $td$ . Перерегулирование минимально, по времени регулирования проигрыш неболь-

шой в отличие от остальных критериев. Для оценки эффективности произведена проверка некоторых вариантов применения ФУО. Общая настройка производилась последовательно. Сначала путем минимизации интегрального критерия  $I_3$  осуществлялась настройка ПИД-регулятора. Затем путем минимизации дисперсии на стационарном участке переходного процесса находились постоянная фильтра и коэффициент  $a$  уравнения. Для нахождения скорости использовался реальный фильтр высокой частоты. Его параметры определялись путем минимизации времени переходного процесса (ВПП) или путем минимизации произведения времени переходного процесса и дисперсии  $D$  на стационарном участке на выходе из регулятора (ВППД) (рис. 3). В качестве фильтра использовался фильтр низкой частоты первого порядка. Для этих целей можно применять также фильтр бегущего среднего либо фильтр с использованием метода наименьших квадратов [4]. Настройка статического ФУО это соблюдение баланса между снижением дисперсии и ухудшение динамики регулирования. Динамическое изменение параметра  $a$  позволяет разделить эти задачи при настройке. Более подробно о настройке и полученных результатах можно увидеть [5].

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структуры ФУО позволяют существенно повысить влияние шумов контуры с обратной связью. Комплексная настройка ФУО вместе параметрами ПИД-регулятора может повысить эффективность. Однако использование ДФУО с последовательной настройкой для прикладных задач, в большинстве случаев, будет достаточно: шаг 1. Настраиваем ПИД-регулятор с учетом параметров шума по интегральному критерию; шаг 2. Находим настройки статического ФУО на подавление шумов; шаг 3. Настраиваем ДНФУО для обеспечения быстродействия.

1. Somefun O. A. The dilemma of PID tuning / O. A. Somefun, A. Kayode, D. Folasade // Annual Reviews in Control. 2021. No. 52. P. 65–74.
2. Borase R. P. A review of PID control, tuning methods and applications / R. P. Borase [at al.] // International Journal of Dynamics and Control. 2021. No. 9. P. 818–827.
3. Гринюк Д. А. Моделирование и настройка систем с нелинейной динамикой / Гринюк Д. А. [и др.]. // Труды БГТУ. Сер. 3 – 2021, № 2(248). – С. 65–71.
4. Гринюк Д. А. Использование алгоритмов аппроксимации для сглаживания трендов измерительных преобразователей / Д. А. Гринюк, Н. М. Олиферович, И. Г. Сухорукова. // Труды БГТУ. Сер. 3, 2017. № 2 (200). С. 82–87.
5. Гринюк Д. А. Уменьшение влияния помех измерительного канала на замкнутую систему регулирования / Д. А. Гринюк, [и др.]. // Труды БГТУ. Сер. 3, 2023. № 2 (272). С. 58–70. DOI: 10.52065/2520-6141-2023-272-2-10.