

---

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ (05.13.01)

УДК 681.5.034:681.521.7

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-76-85

### Динамика непрерывных систем управления с элементами запаздывания в составе корректирующих фильтров

М.А. Бабочкин, О.С. Колосов, А.А. Кузнецова

Рассмотрены вопросы применения корректирующих устройств с элементами запаздывания (ЭЗ). Данные фильтры предложены в качестве альтернативы широко используемым в управлении фильтрам высоких частот и низких частот первого порядка.

Показано, что фильтры с ЭЗ позволяют до 30% снизить мощность высокочастотных помех в выходном сигнале регулятора по сравнению с традиционными фильтрами. Причем эти результаты показываются при использовании их в составе замкнутых непрерывных систем.

Проанализированы два варианта включения фильтров, используемых в практике управления. Первый вариант — последовательное включение фильтров в контур управления (применительно к астатическим системам с пропорционально-дифференцирующим регулятором как в линейном, так и в релейном вариантах работы). Второй вариант — использование корректирующего фильтра в местной обратной связи на примере обобщенного представления позиционной приборной следящей системы.

Предложен достаточно простой способ определения параметров фильтров с ЭЗ, обеспечивающих возможность использования традиционных методик синтеза регуляторов в частотной области и оценки их динамических свойств.

*Ключевые слова:* элемент запаздывания, помеха, частотные характеристики, корректирующий фильтр, регулятор, система управления.

*Для цитирования:* Бабочкин М.А., Колосов О.С., Кузнецова А.А. Динамика непрерывных систем управления с элементами запаздывания в составе корректирующих фильтров // Вестник МЭИ. 2021. № 1. С. 76—85. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-76-85.

### The Dynamics of Continuous Control Systems with Delay Elements as Part of Correction Filters

M.A. Babochkin, O.S. Kolosov, A.A. Kuznetsova

Matters concerned with the application of correction devices containing delay elements are addressed. Such filters are proposed as an alternative to the high-pass filters and low-pass first-order filters that are widely used in control systems.

It is shown that by using filters containing delay elements, the power of high-frequency interference in the controller output signal can be reduced by up to 30% in comparison with the conventional filters. It should be noted that these results are obtained in using the proposed filters in closed-loop continuous systems. Two filter configuration versions used in control applications were analyzed. In the first version, the filters are connected in series in the control loop (as applied to astatic systems with a proportional-differentiating controller in both linear and relay modes of operation). In the second version, a correction filter connected in the local feedback is used (taking a generalized representation of the instrument-assisted position tracking system as an example).

The article proposes a fairly simple method for determining the parameters of filters with a delay element that make it possible to use conventional techniques for synthesizing controllers in the frequency domain and estimating their dynamic properties.

*Key words:* delay element, interference, frequency responses, correction filter, controller, control system.

*For citation:* Babochkin M.A., Kolosov O.S., Kuznetsova A.A. The Dynamics of Continuous Control Systems with Delay Elements as Part of Correction Filters. Bulletin of MPEI. 2021;1:76—85. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-76-85.

## Введение

Элементы транспортного запаздывания (ЭЗ), входящие в структуру математического описания промышленных объектов, вызывают затруднения при синтезе алгоритмов управления замкнутыми системами [1 — 3]. Как правило, подобные объекты управляются с помощью ПИД-регуляторов. Применение ЭЗ в составе корректирующих фильтров непрерывных систем до настоящего времени не находило отражения в литературе, как в силу парадоксальности самой идеи их использования в непрерывных системах, так и в силу отсутствия технической возможности простой реализации ЭЗ.

Данная работа посвящена сравнительному анализу свойств непрерывных систем с традиционными непрерывными корректирующими устройствами и таких же систем с корректирующими устройствами, содержащими ЭЗ. Затронут вопрос возможности технической реализации ЭЗ для корректирующих устройств.

Циклический характер изменения фазочастотной характеристики (ФЧХ) ЭЗ [4, 5] в сочетании с обычными пропорциональными звеньями позволяет реализовать циклическое изменение как амплитудно-частотных (АЧХ), так и фазочастотных характеристик подобных соединений, если их использовать в качестве корректирующих фильтров. Такие фильтры в данной работе проанализированы в качестве альтернативы широко используемым в управлении фильтрам высоких (ФВЧ) и низких (ФНЧ) частот первого порядка. В управлении их называют реальными дифференцирующими и инерционными (апериодическими) звеньями [6, 7]. Известные в радиотехнике фильтры более высоких порядков (Баттерворта, Бесселя, Чебышева и т. д.) в замкнутых системах управления обычно не рассматриваются из-за проблем с устойчивостью [8, 9].

Настоящая работа является логическим продолжением анализа фильтрующих свойств так называемых гребенчатых фильтров (ГФ) при их применении в качестве альтернативы обычным непрерывным фильтрам для систем управления [10]. Изучена динамика систем с фильтрами ФВЧ с ЭЗ с передаточной функцией:

$$W(s) = (1 - Z^{-1}) \frac{R}{\tau} = (1 - e^{-st}) \frac{K}{\tau} = (1 - e^{-st}) \frac{K}{2T_0} \quad (1)$$

и фильтрами ФНЧ с ЭЗ с передаточной функцией:

$$W(s) = (1 - e^{-st}) \frac{K}{s\tau} = (1 - e^{-st}) \frac{K}{2T_0s}, \quad (2)$$

где  $\tau$  — величина запаздывания;

В [10] изучены частотные свойства фильтров (1), (2) и показано, что ГФ (или фильтры с ЭЗ), реализующие свойства ФВЧ или ФНЧ, эквивалентны по своим свойствам аналогичным непрерывным фильтрам в области низких частот, если соблюдается условие для выбора величины запаздывания ЭЗ  $\tau = 2T_0$ , где  $T_0$  — постоянная времени в знаменателе передаточной функции соответствующего эквивалентного непрерывного фильтра (реального дифференцирующего или апериодического). Также в [10] при анализе частотных характеристик фильтров с ЭЗ продемонстрировано, что в области высоких частот такие фильтры дополнительно ослабляют мощность высокочастотных помех в управляющем сигнале за счет циклического изменения ФЧХ, что приводит к появлению периодических «провалов» на АЧХ фильтров. Именно эти «провалы» и способствуют ослаблению амплитуд гармоник спектра помехи в окрестности указанных частот.

Доказано, что фильтры с ЭЗ позволяют существенно снизить мощность высокочастотных помех в выходном сигнале регулятора системы по сравнению с традиционными фильтрами (при работе в составе замкнутых систем). Описаны два варианта включения фильтров, используемых в практике управления.

*Первый вариант* — последовательное включение фильтров в контур управления. Рассматривается на примере системы третьего порядка с пропорционально-дифференцирующим регулятором (ПД-регулятором) как в линейном, так и в релейном вариантах работы.

*Второй вариант* — использование корректирующего фильтра в местной обратной связи (подчиненное управление) на примере упрощенного представления приборной угловой следящей системы второго порядка.

При сравнительном анализе систем с традиционными фильтрами и фильтрами с ЭЗ просматриваются следующие результаты.

Выполняется сравнение динамических свойств систем с испытуемыми фильтрами при обработке ступенчатого сигнала. Сами фильтры имеют практически совпадающие характеристики в определенной области низких частот, что позволяет пользоваться известными методиками синтеза непрерывных систем.

При сравнительном анализе фильтрующих свойств анализируемых корректирующих устройств в составе регулятора анализируется стационарный режим астатических систем, когда сигнал управления на выходе регулятора практически нулевой, но в нем присутствует аддитивно приложенная к выходному сигналу системы помеха в виде равномерно распределенного белого шума, которая прошла регулятор.

Очевидно, что исследуемые примеры представляют на данном этапе чисто академический интерес с целью получения начальной информации о полезных свойствах и недостатках фильтров с ЭЗ не как дополнительных устройств, а как альтернативы известным традиционным в составе непрерывных систем.

### Последовательная коррекция непрерывных систем с помощью ПД-регулятора

Рассмотрим задачу уменьшения мощности высокочастотных помех в выходном сигнале ПИД-регулятора. Необходимость решения данной задачи обычно не требует дополнительных пояснений, поскольку связана с такими важными свойствами синтезируемой системы, как устойчивость, точность, качество переходных процессов, частота срабатывания регулирующей аппаратуры. При синтезе традиционных ПИД-регуляторов используются достаточно проработанные методики, позволяющие до определенной степени снизить влияние высокочастотных помех в управляющем сигнале на работу системы [11, 12].

Передаточная функция непрерывного ПИД-регулятора для управления промышленными объектами в упрощенном виде выглядит как [2, 3]:

$$W_{\text{пид}}(s) = \frac{K_{\text{и}}}{s} + K_{\text{п}} + K_{\text{д}}s,$$

где  $K_{\text{и}}$ ,  $K_{\text{п}}$ ,  $K_{\text{д}}$  — коэффициенты передачи интегрирующего, пропорционального и дифференцирующего каналов.

Наличие высокочастотных помех во входном сигнале ПИД-регулятора, дополнительно усиливающихся при прохождении через пропорциональный и дифференцирующий каналы регулятора, вынуждают проектировщиков предусматривать дополнительную фильтрацию суммы двух сигналов с помощью ФНЧ первого порядка или апериодического (инерционного) звена:

$$\begin{aligned} W_{\text{пд}}(s) &= (K_{\text{п}} + K_{\text{д}}s) \frac{1}{1 + T_0s} = \\ &= K_{\text{п}} \frac{1 + T_1s}{1 + T_0s} = \frac{K_{\text{п}}}{1 + T_0s} + \frac{K_{\text{д}}s}{1 + T_0s}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $T_1 = (K_{\text{д}}/K_{\text{п}}) > T_0$ ;  $T_0$  — постоянная времени дополнительного ФНЧ.

Таким образом, формула (3) представляет собой передаточную функцию ПД-регулятора в виде параллельного соединения ФНЧ и ФВЧ.

Сигнал с выхода канала регулятора, в котором реализуется функция интегрирования, не нуждается в дополнительной фильтрации, так как он, при правильной настройке, существенно ослабляет высокочастотные помехи. По этой причине рассмотрим работу системы с ПД-регулятором.

Проведем сравнение работы двух систем с одинаковыми статическими объектами  $W_{\text{об}}(s)$  и управляющей аппаратурой  $W_{\text{уп}}(s)$ . Одна система работает с традиционным ПИД-регулятором  $W_{\text{пид}}(s)$ , а другая — с ПИД-регулятором, в структуре которого реализуются ФНЧ и ФВЧ с ЭЗ в каналах пропорциональной передачи сигнала и дифференцирования. Подобные системы имеют типовую структуру, показанную на рис. 1.

В представленной структурной схеме управляющая аппаратура  $W_{\text{уп}}(s)$  содержит в своем составе интегрирующее звено, имитирующее работу дозирующих устройств (кранов, задвижек и т. д.).

Рассмотрим достаточно простой числовой пример, результаты которого путем масштабирования несложно интерпретировать для широкого круга объектов.

Пусть передаточная функция объекта имеет вид:

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{K_{\text{об}}}{(Ts + 1)^2},$$

где  $K_{\text{об}}$  — коэффициент передачи объекта;  $T = 1$  с.

Пусть длительность переходного процесса в системе при обработке ступенчатого сигнала не должна превышать 10 с, а перерегулирование ограничится 20% от установившегося значения выходного сигнала. Для этих условий (без учета интегрирующей составляющей регулятора) в традиционном варианте ПД-регулятора (3) по известным методикам вычисляются и реализуются следующие параметры:  $K_{\text{п}} = 1$ ;  $K_{\text{д}} = 1$ ;  $T_0 = 0,1$  с. Для регулятора с ЭЗ коэффициенты передачи по каналам остаются те же, но в соответствии с условием эквивалентности  $\tau = 0,5$  с. На рисунке 2 показаны логарифмические АЧХ разомкнутой системы с традиционным регулятором. Желаемая ЛАЧХ скорректированной системы взята в упрощенном виде, чтобы можно было визуально оценить запас по фазе на частоте среза ( $45^\circ$ ).

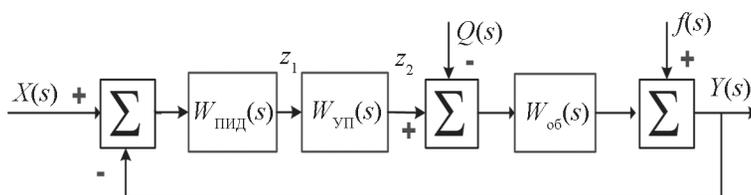


Рис. 1. Типовая структурная схема системы с ПИД-регулятором:

$X(s)$  — изображение входного сигнала;  $Q(s)$  — изображение возмущающего воздействия на объект;  $Y(s)$  — изображение выходного сигнала с учетом шумовой составляющей;  $f(s)$  — изображение аддитивной помехи, приложенной к выходному сигналу;  $W_{\text{уп}}(s)$  — управляющая аппаратура

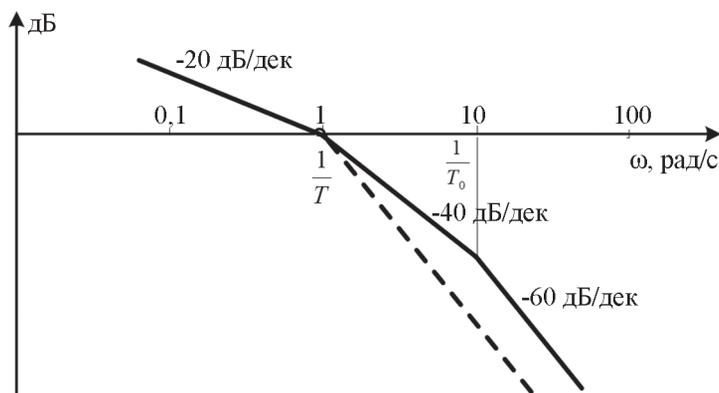


Рис. 2. Логарифмические АЧХ разомкнутой системы с традиционным регулятором:  
 --- система без регулятора; — система с традиционным ПД-регулятором

Такие же упрощенные варианты желаемых ЛАЧХ используют и при анализе других систем. При этом параметры ЛАЧХ подобраны таким образом, чтобы можно было проследить работу фильтров с одними и теми же параметрами в разных системах.

На рисунке 3 представлены совмещенные переходные процессы на выходе объекта при обработке системами ступенчатого входного сигнала и в отсутствии сигнала возмущения  $Q(s)$ . Они свидетельствуют о том, что параметры фильтров с ЭЗ в структуре ПД-регулятора можно однозначно связать с параметрами настройки каналов традиционного ПД-регулятора.

Моделирование систем проводили с использованием Matlab (Simulink), на котором достаточно точно реализуются аналоговые свойства и имитируется работа элемента «транспортное запаздывание». Для этого используется метод интегрирования Эйлера с постоянным шагом 0.001 с, мощность равномерно распре-

ленного сигнала белого шума составляет 0,0001. Шумовая составляющая на выходах объектов практически не просматривается.

На рисунке 4 изображены совмещенные процессы на выходах регуляторов для установившегося режима работы системы.

Расчеты показали, что в замкнутой системе мощность шума на выходе регулятора с фильтрами с ЭЗ при различных фиксированных шагах интегрирования оказывается на 30% меньше аналогичной мощности шума на выходе традиционного регулятора.

### Системы стабилизации с релейным включением ПД-регулятора

Системы стабилизации в промышленной автоматике обычно призваны удерживать стабилизируемый параметр на выходе объекта (например, температуру) с заданной точностью, однозначно связанной с нали-

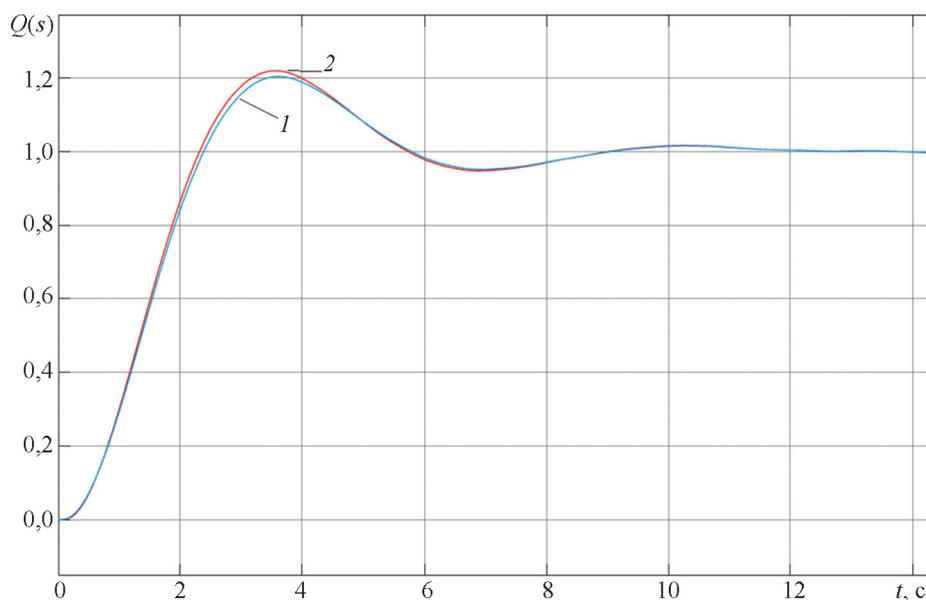


Рис. 3. Переходные процессы на выходе объекта:

1 — система с традиционным ПД-регулятором; 2 — система с фильтрами с ЭЗ в структуре ПД-регулятора

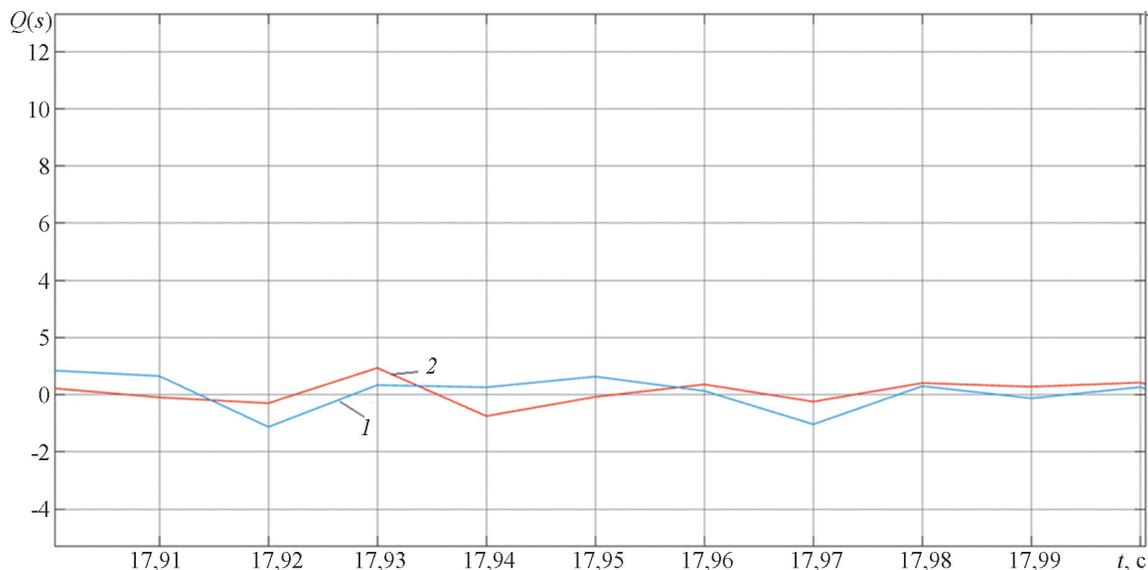


Рис. 4. Совмещенные процессы на выходах регуляторов:

1 — система с традиционным ПД-регулятором; 2 — система с фильтрами с ЭЗ в структуре ПД-регулятора

чем зоны нечувствительности на входе управляющей аппаратуры. Выход сигнала управления за эту зону обычно приводит к срабатыванию релейного элемента, подключающего управляющую аппаратуру. Структура управляющей аппаратуры, используемой при моделировании, вместе с релейным элементом продемонстрирована на рис. 5.

Таким образом, структурная схема системы (рис. 1) для варианта системы стабилизации дополнена релейным элементом с зоной нечувствительности.

Важным показателем качества работы таких систем является частота срабатывания релейного элемента в стационарном режиме. Высокая частота срабатывания способствует быстрому износу механических элементов управляющей и дозирующей аппаратуры (редукторов, кранов, задвижек и т. д.).

Частота срабатывания зависит как от сигнала возмущения  $Q(s)$ , так и от аддитивной помехи  $f(s)$ , приложенной к выходному сигналу объекта. Как правило, возмущающее воздействие в системах стабилизации обладает относительно узким спектром в области низких частот и на коротком промежутке времени наблюдения не оказывает существенного влияния на изменение частоты срабатывания релейного элемента (например, колебания температуры наружного воздуха в системе стабилизации температуры внутри по-

мещения). В то же время высокочастотные помехи в выходном сигнале достаточно сильно влияют на частоту срабатывания релейного элемента. Введение в структуру ПИД-регулятора фильтров с ЭЗ способствует уменьшению частоты срабатывания релейного элемента при наличии в выходном сигнале регулятора случайной составляющей. На рисунке 6 изображены совмещенные графики срабатывания релейных элементов в системах стабилизации с традиционным ПД-регулятором и с фильтрами с ЭЗ в структуре регулятора. Параметры систем и параметры интегрирования идентичны предыдущему примеру. В структуры систем введены релейные элементы, приведенные на рис. 5. Величина возмущения на входе объекта фиксированна и равна 0,01. Величина постоянной уставки на входе системы —  $X = 20$ .

Расчеты показывают уменьшение до 30% частоты срабатывания релейного элемента в системе с фильтрами с ЭЗ в структуре регулятора по сравнению с системой с традиционным ПИД-регулятором.

#### Коррекция непрерывных систем корректирующими обратными связями, охватывающими часть структуры

В практике построения систем управления широко используются приемы охвата части структуры

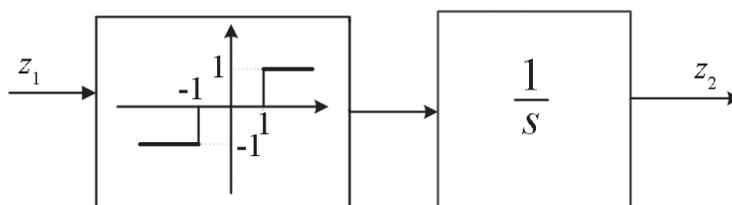


Рис. 5. Структура управляющей аппаратуры вместе с релейным элементом

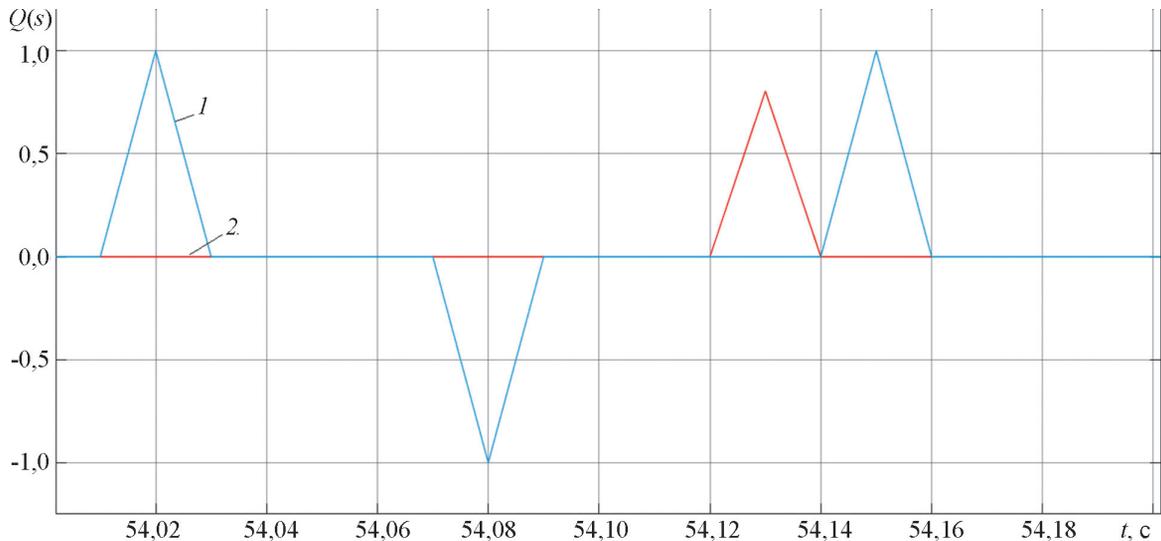


Рис. 6. Совмещенные процессы на выходах регуляторов:

1 — система с традиционным ПД-регулятором; 2 — система с фильтрами с ЭЗ в структуре ПД-регулятора

системы корректирующими обратными связями для достижения системой определенных качественных показателей. Особенно это важно как для маломощных приборных следящих систем, так и для мощных электроприводов в условиях работы с меняющимися в широких пределах нагрузками. Для последних характерно так называемое подчиненное управление, когда охватываемые местными обратными связями фрагменты структуры вложены друг в друга.

Проведем сравнение качества работы простейшей позиционной приборной следящей системы второго порядка с обратной связью двигателя по частоте вращения вала через традиционный ФВЧ (реальное дифференцирующее звено) и через ФВЧ с ЭЗ (1). На рисунке 7 дана обобщенная структурная схема приборной следящей системы.

Представим систему линейной. Такой вариант возможен в окрестности рабочего режима, в качестве которого возьмем режим линейного изменения входного воздействия  $X(t)$  или режим равномерной заводки. Возмущающее воздействие  $Q(t)$  — приведенный к входу двигателя постоянный момент нагрузки. Угловую скорость вращения вала двигателя обозначим как  $\omega(t)$ .

Рассматриваемый рабочий режим следящей системы обеспечивает вращение вала нагрузки с постоянной скоростью. Не касаясь природы источника приложенных помех  $f(s)$ , для сохранения общности получаемых результатов с рассмотренными примерами, считаем, что это равномерно распределенный белый шум.

Пусть усилительно-преобразовательное устройство системы, включающее в себя измерительную часть системы и предварительный усилитель, будет безинерционным:

$$K_{\text{упу}} = 1 \text{ Нм/рад}, X(t) = 1t \text{ рад}, Q(t) = 1 \text{ Нм}.$$

Пусть передаточные функции двигателя по скорости и корректирующей обратной связи (традиционный ФВЧ) имеют вид:

$$W_{\text{ог}}(s) = \frac{300}{0,1s + 1}; W_{\text{ос}}(s) = \frac{0,0033s}{0,1s + 1}. \quad (4)$$

Пусть к коэффициентам передачи блоков (4) приведены все реальные коэффициенты передачи физических блоков структуры системы, таких как: измерительное устройство, предварительный усилитель,

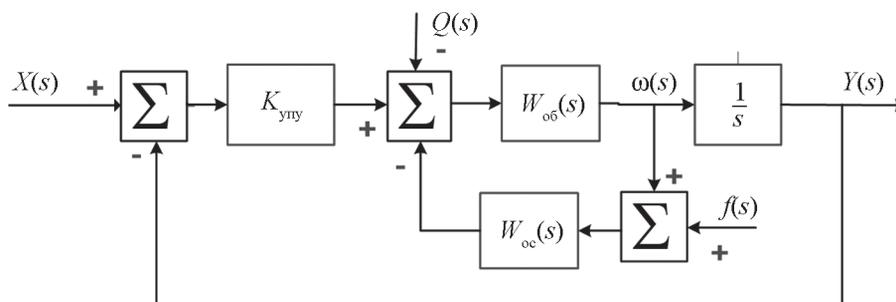


Рис. 7. Обобщенная структурная схема приборной следящей системы

тахогенератор, усилитель мощности и силовой редуктор. На рисунке 8 представлены асимптотические логарифмические АЧХ разомкнутой системы.

Вид так называемой «желаемой» или скорректированной системы взят с таким расчетом, чтобы запас по фазе на частоте среза, также как и в примере системы с ПД-регулятором, составлял примерно  $45^\circ$ .

При сравнительном моделировании работы систем с традиционным ФВЧ и ФВЧ с ЭЗ использованы те же параметры интегрирования, что и при моделировании систем. Результаты моделирования показали расхождения наблюдаемых процессов на выходах систем подобные изображенным на рис. 3, и поэтому не приводятся. На рисунке 9 даны совмещенные приведенные к входу процессы управления для установившегося режима.

В результате моделирования процессы для установившегося режима являются суммой всех входных сигналов и сигналов всех обратных связей, которые можно пересчитать и привести к любой точке струк-

туры. Сравнительная оценка мощности случайной составляющей в указанных сигналах, как и в предыдущих вариантах, показала уменьшение примерно на 30% для системы с ФВЧ с ЭЗ по сравнению с системой с традиционным ФВЧ в обратной связи.

Более сложные структуры систем с подчиненным управлением требуют отдельного детального анализа и не рассматривались ввиду ограниченности объема статьи.

### Вопросы технической реализации фильтров с ЭЗ для систем управления

Использование промышленных микропроцессорных управляющих контроллеров (МК), на базе которых реализуются алгоритмы ПИД-регулирования, для управления разнообразными производственными объектами является одним из приоритетных направлений развития цифровой управляющей техники. В хорошо известных в нашей стране публикациях [11 — 14] по развитию и применению ПИД-регуляторов

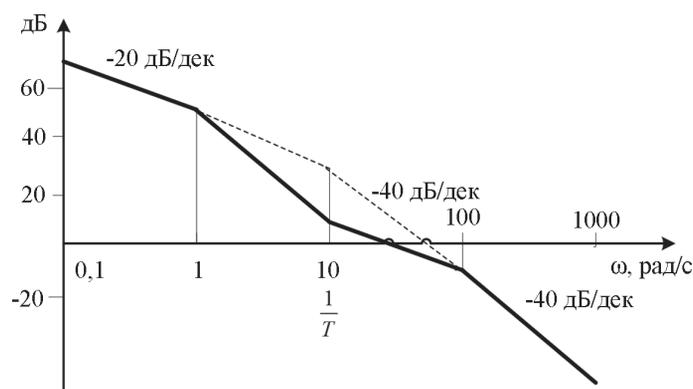


Рис. 8. Асимптотические логарифмические АЧХ разомкнутой системы: без коррекции (---) и скорректированной традиционным ФВЧ (—)

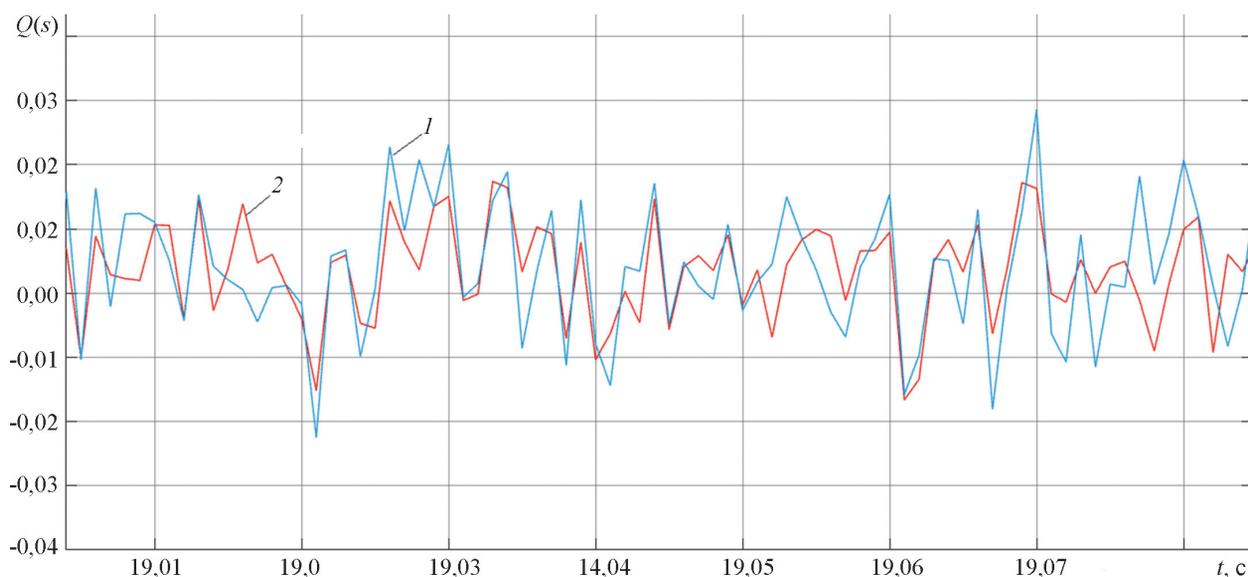


Рис. 9. Совмещенные приведенные к входу процессы управления для установившегося режима: 1 — система с традиционным ФВЧ в обратной связи; 2 — система с ФВЧ с ЭЗ в обратной связи

в промышленной автоматике отмечается, что их доля составляет не менее 90% от общего числа используемых управляющих устройств, и на настоящий момент не просматриваются тенденции, ведущие к изменению подобной пропорции. В связи с этим любые разработки, направленные на повышение качества работы автоматических систем с ПИД-регуляторами на базе промышленных МК, могут оказаться актуальными применительно к конкретным условиям использования ПИД-регулятора. Появление дискретной управляющей техники, пока она не обладала хорошим быстродействием, вело к возникновению дополнительных эффектов в системах, связанных с относительно грубой дискретизацией сигналов во времени и по уровню. Эти эффекты учитывали хорошо разработанная к тому времени теория импульсных систем [15, 16] и численные методы в математике [17 — 19]. Однако, современные МК позволяют, во многих случаях, при анализе и синтезе систем с ПИД-регуляторами вернуться к традиционным, удобным для сравнения методам исследований непрерывных систем в частотной области.

Современные МК обладают достаточно высокой разрядностью процессора и тактовой частотой, которые обеспечивают управление большинством объектов в реальном времени и позволяют реализовать стандартные настройки традиционного непрерывного ПИД-регулятора

Активное внедрение МК в практику управления во многих случаях может снять проблему реализации эффектов транспортного запаздывания, а большая разрядность процессоров и их высокая тактовая частота, по отношению полосе пропускания промышленных систем, позволяет считать такие ЭЗ практически непрерывными. Современная микропроцессорная техника, использующая, например, 32-разрядные процессоры с тактовой частотой до 80 МГц (микроконтроллер серии 1986VE9x фирмы АО «ПКК Миландр»), обеспечивает работу регулятора в системе управления в реальном времени, т. е. фактически как непрерывного устройства [6, 7, 17, 18]. Этому способствует и относительно узкая полоса пропускания промышленных систем, редко превышающая 100 рад/с [2, 3].

Отметим, что в радиотехнике [11, 12, 20] известны цифровые фильтры (ЦФ), называемые гребенчатыми фильтрами (ГФ), в которых, за счет пропуска определенного числа отсчетов входного сигнала, происходит дробление оси частот АЧХ и ФЧХ фильтра на участки меньшей протяженности по сравнению с вариантом без пропуска отсчетов. Такой прием называют редукцией или децимацией [11, 12]. Он может быть применен к любым ЦФ, превращая их в гребенчатые фильтры. При этом частично сохраняются свойства исходного фильтра на получающихся укороченных частотных интервалах. Подобная периодизация поясняется с использованием общей теории импульсных систем [15, 16].

Математическое описание частотных свойств ГФ в [11, 12] естественным образом привязана к величине запаздывания  $\tau$ , характеризующей свойства не-

прерывного ЭЗ. Поскольку для анализа работы таких фильтров в составе непрерывных систем управления с относительно узкой полосой пропускания не имеет значение кратность величины запаздывания частоте дискретизации МК, то во многих практических случаях можно считать фильтры с ЭЗ непрерывными.

Следует отметить, что описанные в работе фильтры с ЭЗ не следует рассматривать как универсальную альтернативу при синтезе различных систем управления. Тут необходимо сопоставлять частоту среза системы с реально получающейся частотой дискретизации, реализуемой контроллером, который во многих сложных системах выполняет функции не только корректирующего устройства, но и управляет сопрягающими устройствами, обеспечивает решение задач адаптации при изменении параметров объекта, решает задачи контроля и управления в аварийных ситуациях и т. д. Все это естественным образом снижает частоту дискретизации системы применительно к основному контуру управления. В любом случае реальная частота дискретизации должна более чем на порядок превышать частоту среза разомкнутой системы, если рассматривать вопрос о возможности применения фильтров с ЭЗ в качестве корректирующих устройств.

В работах по применению фильтров с ЭЗ интересна стыковка получаемых результатов по использованию фильтров с ЭЗ в непрерывных системах с результатами синтеза подобных фильтров с использованием методов Z-преобразования при заметном проявлении частоты квантования в сигнале управления МК.

### Заключение

Изучены вопросы применения корректирующих устройств с элементами запаздывания (ЭЗ). Данные фильтры предлагаются в качестве альтернативы широко используемым в управлении фильтрам высоких частот и фильтрам низких частот первого порядка.

Показано, что фильтры с ЭЗ позволяют до 30% снизить мощность высокочастотных помех в выходном сигнале регулятора по сравнению с традиционными фильтрами. Результаты получены как непосредственно при анализе работы самих фильтров, так и при использовании их в составе замкнутых систем.

Представлены два варианта включения фильтров, задействованных в процессе управления. Первый — последовательное включение фильтров в контур управления. Он использован для астатических систем с пропорционально-дифференцирующим регулятором как в линейном, так и в релейном вариантах работы. Ко второму относится использование корректирующего фильтра в местной обратной связи на примере обобщенной представления позиционной приборной следящей системы.

Дан простой способ определения параметров фильтров с ЭЗ, обеспечивающих возможность использования традиционных методик синтеза регуляторов в частотной области и оценки их динамических свойств.

## Литература

## References

1. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. М.: Машиностроение, 1974.
2. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М.: Энергия, 1973.
3. Кулаков Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования. М.: Высшая школа, 1984.
4. Колосов О.С., Кошоева Б.Б. Алгоритмы численного дифференцирования реального времени для задач автоматизации и управления. Новые технологии. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 2. С. 10—15.
5. Колосов О.С., Подольская И.Е., Кульмамиров С.А., Фон Чжаньлин. Алгоритмы численного дифференцирования в задачах управления. М.: Издат. дом МЭИ, 2009.
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972.
7. Нетушил А.В. Теория автоматического управления. М.: Высшая школа, 1976.
8. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры. Расчет и реализация. М.: Мир, 1982.
9. Коберниченко В.Г. Расчет и проектирование цифровых фильтров. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2015.
10. Бабочкин М.А., Колосов О.С., Кузнецова А.А. Снижение мощности высокочастотных помех в сигнале управления автоматических систем гребенчатыми фильтрами // Вестник МЭИ. 2020. № 6. С. 91—100.
11. Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID Control. An Overview and Analysis of the Current art // IEEE Control Systems Magazine. 2006. No. 2. Pp. 41—54.
12. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66—74; 2007. № 1. С. 78—88.
13. Quevedo J., Escobet T. Digital Control: Past, Present and Future of PID Control // Proc. IFAC Workshop. Terrassa, 2000. Pp. 5—7.
14. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID Control. ISA, 2006.
15. Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования. М.: Физматгиз, 1963.
16. Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем. М.: Физматгиз, 1963.
17. Турчак Л.И. Основы численных методов. М.: Наука, 1990.
18. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1967.
19. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984.
20. Вейцель В.А. Теория и проектирование радиосистем радиопередачи информации. М.: Горячая линия – Телеком, 2018.

1. Guretskiy Kh. Analiz i Sintez Sistem Upravleniya s Zapazdyvaniem. M.: Mashinostroenie, 1974. (in Russian).
2. Rotach V.Ya. Raschet Dinamiki Promyshlennykh Avtomaticheskikh Sistem Regulirovaniya. M.: Energiya, 1973. (in Russian).
3. Kulakov G.T. Inzhenernye Ekspress-metody Rascheta Promyshlennykh Sistem Regulirovaniya. M.: Vysshaya Shkola, 1984. (in Russian).
4. Kolosov O.S., Koshoeva B.B. Algoritmy Chislennogo Differentsirovaniya Real'nogo Vremeni dlya Zadach Avtomatizatsii i Upravleniya. Novye Tekhnologii. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2012;2:10—15. (in Russian).
5. Kolosov O.S., Podol'skaya I.E., Kul'mamirov S.A., Fon Chzhan'lin'. Algoritmy Chislennogo Differentsirovaniya v Zadachakh Upravleniya. M.: Izd. Dom MEI, 2009. (in Russian).
6. Besekerskiy V.A., Popov E.P. Teoriya Sistem Avtomaticheskogo Regulirovaniya. M.: Nauka, 1972. (in Russian).
7. Netushil A.V. Teoriya Avtomaticheskogo Upravleniya. M.: Vysshaya Shkola, 1976. (in Russian).
8. Lem G. Analogovye i Tsifrovye Fil'try. Raschet i Realizatsiya. M.: Mir, 1982. (in Russian).
9. Kobernichenko V.G. Raschet i Proektirovanie Tsifrovyykh Fil'trov. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo Unta, 2015. (in Russian).
10. Babochkin M.A., Kolosov O.S., Kuznetsova A.A. Snizhenie Moshchnosti Vysokochastotnykh Pomekh v Signale Upravleniya Avtomaticheskikh Sistem Grebenchatymi Fil'trami. Vestnik MEI. 2020;6:91—100. (in Russian).
11. Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID Control. An Overview and Analysis of the Current Art. IEEE Control Syst. Magazine. 2006;2:41—54.
12. Denisenko V.V. PID-regulyatory: Printsipy Postroeniya i Modifikatsii. Sovremennye Tekhnologii Avtomatizatsii. 2006;4:66—74; 2007;1:78—88. (in Russian).
13. Quevedo J., Escobet T. Digital Control: Past, Present and Future of PID Control. Proc. IFAC Workshop. Terrassa, 2000:5—7.
14. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID Control. ISA, 2006.
15. Dzhuri E. Impul'snye Sistemy Avtomaticheskogo Regulirovaniya. M.: Fizmatgiz, 1963. (in Russian).
16. Tsyarkin Ya.Z. Teoriya Lineynykh Impul'snykh Sistem. M.: Fizmatgiz, 1963. (in Russian).
17. Turchak L.I. Osnovy Chislennykh Metodov. M.: Nauka, 1990. (in Russian).
18. Ango A. Matematika dlya Elektro- i Radioinzhenerov. M.: Nauka, 1967. (in Russian).
19. Korn G., Korn T. Spravochnik po Matematike dlya Nauchnykh Rabotnikov i Inzhenerov. M.: Nauka, 1984. (in Russian).
20. Veytsel' V.A. Teoriya i Proektirovanie Radiosistem Radioupravleniya i Peredachi Informatsii. M.: Goryachaya Liniya – Telekom, 2018. (in Russian).

**Сведения об авторах:**

**Бабочкин Михаил Андреевич** — аспирант кафедры управления и интеллектуальных технологий НИУ «МЭИ», e-mail: babochkamisha@mail.ru

**Колосов Олег Сергеевич** — доктор технических наук, профессор кафедры управления и интеллектуальных технологий НИУ «МЭИ», e-mail: KolosovOS@mpei.ru

**Кузнецова Анна Александровна** — консультант отдела эксплуатации зданий и сооружений филиала ФКУ «Налог-сервис» ФНС России по ЦОД в г. Дубна, Московская область, e-mail: aleksandrovna393@yandex.ru

**Information about authors:**

**Babochkin Mikhail A.** — Ph.D-student of Control and Intelligent Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: babochkamisha@mail.ru

**Kolosov Oleg S.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Control and Intelligent Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: KolosovOS@mpei.ru

**Kuznetsova Anna A.** — Consultant of the Operation of Buildings and Structures Dept., Branch of FKU «Tax-service» of the Federal Tax Service of Russia for Data Centers in Dubna, Moscow Region, e-mail: aleksandrovna393@yandex.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 22.03.2020

**The article received to the editor:** 22.03.2020