

УДК 681.515

## ПЕРЕОБОРУДОВАНИЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ НЕУСТОЙЧИВЫХ ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В ФИЛЬТРОВАННЫЙ ПРЕДИКТОР СМИТА

**А. И. Бобиков**, к.т.н., доцент кафедры АИТУ РГРТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0001-7440-3118, e-mail: tanya.bubnova.94@mail.ru;

**Т. С. Бубнова**, аспирант кафедры АИТУ РГРТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0002-7085-0591, e-mail: tanya.bubnova.94@mail.ru;

*Рассмотрена методика переоборудования ПИД-регуляторов, используемых для управления неустойчивыми объектами с запаздыванием, в фильтрованный предиктор Смита. Целью работы является уменьшение перерегулирования, повышение быстродействия системы управления, а также уменьшение влияния возмущающих воздействий на работу системы. Показано, каким образом можно выбрать параметры двух регуляторов, входящих в структуру предиктора Смита, чтобы получить систему, эквивалентную системе с ПИД-регулятором с точки зрения реакции на возмущающее воздействие. Такая система обеспечивает лучшие показатели качества при решении задачи слежения за постоянным задающим воздействием за счет компенсации запаздывания, достигаемого с помощью предиктора Смита. Для улучшения реакции на возмущающее воздействие в обратную связь был добавлен фильтр, особенности структуры которого, в частности отличие от единицы присущего ему коэффициента усиления, позволяют снизить влияние возмущающих воздействий. Моделирование было осуществлено на примере неустойчивых объектов с запаздыванием в пакете Matlab/Simulink. Представленные результаты показывают эффективность предложенной методики проектирования.*

**Ключевые слова:** объект с запаздыванием, неустойчивый объект, предиктор Смита, ПИД-регулятор, фильтр.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2020-74-108-118

### Введение

Пропорциональные-интегральные-дифференциальные (ПИД) регуляторы широко используются в различных промышленных приложениях, в которых необходимы отслеживание задающих воздействий и подавление влияния возмущающих воздействий. Эти регуляторы обеспечивают оптимальную и робастную работу в широком диапазоне рабочих условий для устойчивых, неустойчивых и нелинейных объектов. В зависимости от конфигурации регулятора (расположение П-, И- и Д- регуляторов) ПИД классифицируется как идеальный ПИД, последовательный ПИД и параллельный ПИД. Поскольку идеальный ПИД-регулятор имеет практические трудности реализации из-за его неосуществимой природы, он в значительной степени рассматривается в академических исследованиях. Параллельные ПИД-регуляторы нашли широкое применение в промышленности благодаря простоте реализации в аналоговой или цифровой форме.

Основными недостатками параллельных ПИД-регуляторов являются эффекты скачков пропорциональной и дифференциальной составляющих управляющего воздействия. Чтобы минимизировать влияние этих эффектов, во многих работах рассматриваются модифицированные формы структур параллельного регулятора, такие как ПИ-ПД [1].

Неустойчивые объекты с запаздыванием, рассматриваемые в данной работе, широко применяются в химической промышленности (реакторы с экзотермической мешалкой и обратным перемешиванием, насосы с резервуаром для хранения жидкости, комбинированный теплообменник «исходный/исходящий», поток с адиабатической экзотермической реакцией,

биореактор, реактор полимеризации, CSTR с рубашкой) [2]. Точная настройка параметров регулятора для этих систем значительно сложнее, чем для устойчивых объектов с разомкнутым управлением, поскольку, во-первых, неустойчивые объекты трудно стабилизировать из-за неустойчивых полюсов, во-вторых, коэффициенты усиления регулятора ограничены минимальным и максимальным значениями в зависимости от объекта, в-третьих, увеличение времени запаздывания в объекте ограничивает качество управляемой замкнутой системы управления, в-четвертых, возможны выбросы и/или обратные реакции из-за наличия нулей в модели объекта.

Как видно из литературы по управлению, было предпринято много попыток разработать оптимальные и робастные регуляторы для неустойчивых объектов с запаздыванием. В [2] предложен метод синтеза для разработки ПИД-регулятора на основе управления с внутренней моделью и ПИД регулятора (УВМ-ПИД) для класса неустойчивых объектов с запаздыванием. В [3] авторы предложили схему регулятора ПИ-ПД для неустойчивых объектов на основе запасов устойчивости по фазе и модулю. В [4] рассмотрена идентификация неустойчивых объектов на основе реле и настройки ПИД-регулятора. В [5] разработана аналитическая схема управления с двумя степенями свободы для отслеживания задающего воздействия. В [6] предложена схема управления для большего подавления влияния возмущающих воздействий. В [7] обсуждена настройка взвешенного ПИД-регулятора для неустойчивого объекта с запаздыванием. Там же показано, что на основе весового параметра задающего воздействия простой ПИД-ПИД-регулятор может использоваться для получения базовых и модифицированных ПИД-структур. Помимо вышеперечисленных методов, обзор методов настройки регулятора для класса неустойчивых объектов с запаздыванием можно найти в книгах [8, 9].

Передаточные функции по задающему и по возмущающему воздействиям для всех этих ПИД-регуляторов оказываются связанными между собой, так что изменение параметров одной из них приводит к изменению другой. Поэтому было предложено использовать предиктор Смита, который позволяет за счет введения двух регуляторов, один из которых служит для решения задачи слежения, а другой – для решения задачи регулирования, развязать зависимость между упомянутыми передачными функциями. Подобный подход позволяет разделить управление таким образом, чтобы первый регулятор работал без учета запаздывания объекте управления (ОУ), а второй корректировал разницу между сигналами с реального ОУ и с его модели с учетом запаздывания. Кроме того, ранее в работе [9] была предложена методика преобразования предиктора Смита для устойчивых объектов с запаздыванием путем добавления низкочастотного фильтра в обратную связь с ОУ. При этом такая модификация получила название *фильтрованного предиктора Смита* (ФПС). Для устойчивых объектов с запаздыванием, в которых в классическом варианте используется лишь один, как правило, ПИД-регулятор с целью обеспечить нулевую установившуюся ошибку воспроизведения при постоянном задающем воздействии, следует ограничить класс низкочастотных фильтров лишь такими, которые имеют единичный коэффициент усиления.

Тем не менее, настройка предиктора Смита на основе модели неустойчивого объекта с запаздыванием также требует сложных вычислений для определения параметров, включенных в замкнутую систему управления регуляторов. Чтобы облегчить решение этой проблемы, в данной статье предлагается осуществить переоборудование уже спроектированных ПИД-регуляторов с выбранными параметрами в фильтрованный предиктор Смита с двумя регуляторами. При этом передачная функция (ПФ) регулятора в прямой цепи равна ПФ замкнутой системы с ПИД-регулятором, деленной на передачную функцию объекта управления. Передачная функция регулятора обратной связи выбирается равной ПФ ПИД-регулятора, если система с ПИД-регулятором реализована без местной обратной связи, или как сумма передачных функций ПИ-регулятора и ПД-регуляторов если разомкнутая система с ПИД-регулятором реализована в виде последовательного соединения ПИ-регулятора и объекта управления, охваченного местной обратной связью с помощью ПД-регулятора. В

результате переоборудования получаем систему с предиктором Смита, которая эквивалентна системе с ПИД-регулятором с точки зрения реакции на возмущающее воздействие и превосходит последнюю с точки зрения реакции на постоянное задающее воздействие, что обусловлено тем обстоятельством, что из знаменателя передаточной функции по задающему воздействию исключено запаздывание.

В силу несвязанности передаточных функций по задающему и по возмущающему воздействиям в системе с предиктором Смита появляется возможность снять ограничение на передаточную функцию фильтра по коэффициенту усиления. Отсюда, варьируя параметры этого фильтра, можно улучшить качество управления относительно реакции на возмущающее воздействие.

Для оценки эффективности предложенного метода проведено имитационное исследование с использованием класса моделей неустойчивых объектов.

### Структурная схема используемого предиктора Смита

Схема показана на рисунке 1, где  $W_1(p)$  – передаточная функция неустойчивого объекта,  $\tau$  – время запаздывания объекта,  $W_m(p)$  – передаточная функция модели объекта, а  $\tau_m$  – время запаздывания модели.  $W_2(p)$  – передаточная функция регулятора для отслеживания задающего воздействия, а регулятор с передаточной функцией  $W_3(p)$  предназначен для стабилизации неустойчивого объекта и также служит для уменьшения влияния возмущающего воздействия. Для устойчивых объектов с запаздыванием в [9] предложено использовать фильтр первого порядка в канале обратной связи с целью улучшения реакции на возмущающее воздействие и повышения робастности к неопределенностям модели. В настоящей работе также для неустойчивого объекта с запаздыванием используется фильтр первого порядка с ПФ  $W_F(p)$  с той же целью.

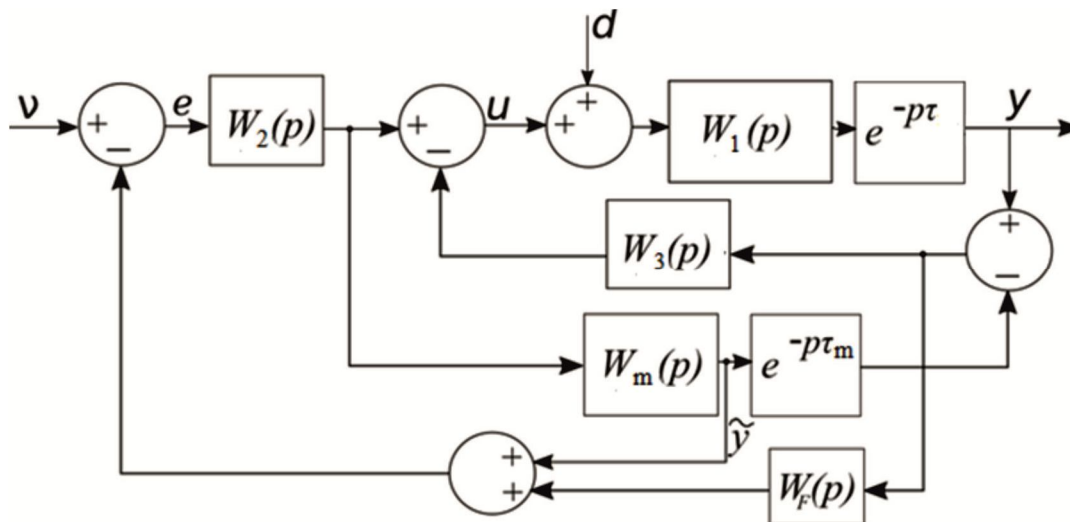


Рисунок 1 – Структурная схема замкнутой системы управления с фильтром, ПИД-регулятором и предиктором Смита

Figure 1 – Block diagram of control system with filter, PID controller and Smith predictor

Передаточные функции замкнутой системы для проблем слежения и регулирования

$$\Phi(p) = \frac{y}{v} = \frac{W_2(p)W_m(p)e^{-p\tau_m}}{1 + W_2(p)W_m(p)}, \quad (1)$$

$$\Phi_d(p) = \frac{y}{d} = \frac{1 + W_2(p)W_m(p) - W_2(p)W_F(p)W_m(p)e^{-p\tau_m}}{[1 + W_2(p)W_m(p)][1 + W_3(p)W_m(p)e^{-p\tau_m}]}, \quad (2)$$

предполагают, что модель точно представляет процесс  $W_1(p)e^{-p\tau} = W_m(p)e^{-p\tau_m}$ .

Из уравнений (1) и (2) видно, что реакция на задающее воздействие не связана с выбором регулятора с передаточной функцией  $W_3(p)$  и, следовательно, регулятор с передаточной функцией  $W_2(p)$  может быть настроен предварительно для достижения хорошего отслеживания задающего воздействия. Однако уменьшение влияния возмущения зависит от обоих регуляторов. Как только передаточная функция  $W_2(p)$  определена для отслеживания задающего воздействия, то выбирается передаточная функция  $W_3(p)$  для стабилизации неустойчивого объекта с запаздыванием по времени и, таким образом, для уменьшения влияния возмущений. Но из уравнения (2) следует отметить, что выбор передаточной функции  $W_3(p)$  должен принимать во внимание запаздывание, потому что результирующий характеристический многочлен для уменьшения влияния возмущения [второй сомножитель знаменателя уравнения (2)] включает в себя запаздывание. Если передаточная функция  $W_2(p)$  выбрана с интегральным действием (типа ПИ или ПИД), то из уравнения (1) можно увидеть, что регулятор с такой  $W_2(p)$  вводит нуль в выражение  $y/v$ , и этот нуль порождает нежелательный выброс в реакции системы с обратной связью. Чтобы уменьшить перерегулирование, требуется либо применение предварительного фильтра, либо взвешивание выходного сигнала этого регулятора с помощью включения дополнительного инерционного фильтра.

На практике всегда существует несоответствие моделей объекта и реального объекта. В силу того факта, что система с предиктором Смита построена на основе систем с ПИД-регулятором, которые отвечают требованиям робастности, следует ожидать, что разработанные регуляторы будут работать хорошо при несовпадении моделей объекта и реального объекта. Заметим, что в условиях несоответствия этих моделей отслеживание задающего воздействия не отделено от реакции на возмущения.

### Предлагаемые методы проектирования регуляторов

Структура используемого предиктора Смита требует проектирования двух регуляторов с передаточными функциями  $W_2(p)$  и  $W_3(p)$ . Проектирование этих регуляторов базируется на уже спроектированных системах с ПИД-регуляторами и объясняется в этом разделе.

Передаточные функции систем с ПИД-регуляторами соответственно по задающему воздействию и возмущению для неустойчивых объектов с запаздыванием имеют тот же вид:

$$\Phi(p) = \frac{y}{v} = \frac{W_2(p)W_m(p)e^{-p\tau_m}}{1 + W_2(p)W_m(p)e^{-p\tau_m}}, \quad (3)$$

$$\Phi_d(p) = \frac{y}{d} = \frac{W_m(p)e^{-p\tau_m}}{1 + W_3(p)W_m(p)e^{-p\tau_m}} \quad (4)$$

как для реализации ПИ-ПД, так и для традиционной реализации. Фактически для проектирования регуляторов используется прямой метод синтеза [16], в котором предполагается, что заданы соответствующие им желаемые ПФ.

Для синтеза отслеживающего регулятора используем в качестве желаемой ПФ

$$\Phi_{жс}(p) = \frac{y}{v} = \frac{W_{nu}(p)W_m(p)e^{-p\tau_m}}{1 + W_{nuo}(p)W_m(p)}, \quad (5)$$

где

$$W_{nuo}(p) = W_{nu}(p) + W_{no}(p). \quad (6)$$

Приравнявая выражения (1) и (5), находим ПФ регулятора для отслеживания задающего воздействия при реализации ПИ-ПД:

$$W_2(p) = \frac{W_{nu}(p)}{1 + W_{пд}(p)W_m(p)}. \quad (7)$$

Заметим, что в этом случае роль взвешивающего выходной сигнал ПИ-регулятора играет фильтр с  $1/[1+W_{\text{ндо}}(p)W_m(p)]$ , позволяющий уменьшить перерегулирование в реакции на задающее воздействие.

Для традиционной реализации ПИД-регулятора при желаемой ПФ

$$\Phi_{\text{ж}}(p) = \frac{y}{v} = \frac{W_{\text{пид}}(p)W_m(p)e^{-p\tau_m}}{1+W_{\text{пид}}(p)W_m(p)}, \quad (8)$$

аналогичным путем из выражений (1) и (8) получаем:

$$W_2(p) = W_{\text{ндо}}(p). \quad (9)$$

Для синтеза регулятора по возмущению используем в качестве желаемой ПФ

$$\Phi_{\text{дкс}}(p) = \frac{W_m(p)e^{-p\tau_m}}{1+W_{\text{ндо}}(p)W_m(p)e^{-p\tau_m}} \quad (10)$$

и, приравнявая к ней передаточную функцию, описываемую выражением (4), находим передаточную функцию для регулятора по возмущению как для реализации ПИ-ПД, так и для традиционной реализации:

$$W_3(p) = W_{\text{ндо}}(p). \quad (11)$$

Что касается ПФ фильтра  $W_F(p)$ , то стандартно для устойчивого объекта в предикторе Смита он проектируется таким образом, прежде всего, чтобы сохранялось равенство выходного сигнала системы  $y$  входному  $v$  в установившемся режиме. ПФ такого фильтра описывается выражением:  $W_F(p) = \frac{1}{Tfp+1}$ . Однако для неустойчивых объектов мы предлагаем ис-

пользовать фильтр вида  $W_F(p) = \frac{Tf1p+Tf2}{Tfp+1}$ . При этом особым условием его использования

является тот фактор, что фильтр должен быть низкочастотным, в этом случае он позволит не только улучшить реакцию системы на возмущающие воздействия, приложенные на вход ОУ, но и обеспечит робастность системы управления к неточностям моделирования объекта.

### Экспериментальные исследования

Рассмотрено несколько примеров моделирования систем с неустойчивыми ОУ с запаздыванием и фильтрованным предиктором Смита, представлены сравнительные результаты по работе систем. На всех рисунках введены следующие обозначения для графиков, отображающих реакцию на внешние воздействия: *pid* — реакция системы с ПИД-регулятором, *pidsmith* — реакция системы с предлагаемым предиктором Смита без фильтра и *pidsmithfilter* — реакция системы с предлагаемым фильтрованным предиктором Смита.

Все моделирование осуществлено в пакете Matlab/Simulink.

**Пример 1.** В качестве первого примера рассмотрим неустойчивый ОУ из работы [15] с двумя положительными вещественными полюсами. Передаточная функция ОУ имеет вид:

$$W(p) = \frac{(5p+1)e^{-p}}{50p^2-15p+1}. \text{ Реакция систем на постоянное единичное входное воздействие и воз-}$$

мущающее воздействие представлена на рисунках 2 и 3. На рисунке 2 показаны выходные сигналы систем с предлагаемым предиктором Смита (сплошная линия) и с ПИД-регулятором (штрихпунктирная линия). На рисунке 3 сплошная линия — реакция системы с фильтрованным предиктором Смита, штрихпунктирная линия — реакция системы с предлагаемым предиктором Смита. Возмущающее воздействие, приложенное в момент времени  $t = 25$  с, имеет ступенчатый характер и описывается как  $d(t) = -1 \cdot 1(t-25)$ . При этом параметры ПИД-регулятора для всех трех реакций одинаковы и имеют значения:  $K_p = 9,4143$ ,  $K_i = 1,8398$ ,  $K_d = 5,7277$ . Параметры фильтра выбраны равными:  $Tf1 = 0,8$  с.,  $Tf2 = 0,2$  с.,  $Tf = 0,01$  с.

В таблице 1 представлены сравнительные характеристики систем с ПИД-регулятором, с предиктором Смита и с предлагаемым фильтрованным предиктором Смита. Стоит уточнить, что во всех примерах используется непрерывный ПИД-регулятор. Из полученных результатов можно сделать вывод, что предлагаемый предиктор Смита позволяет в значительной степени уменьшить перерегулирование системы и немного снизить время нарастания. Однако существенного уменьшения влияния возмущающего воздействия на ОУ удалось добиться только с помощью фильтра.

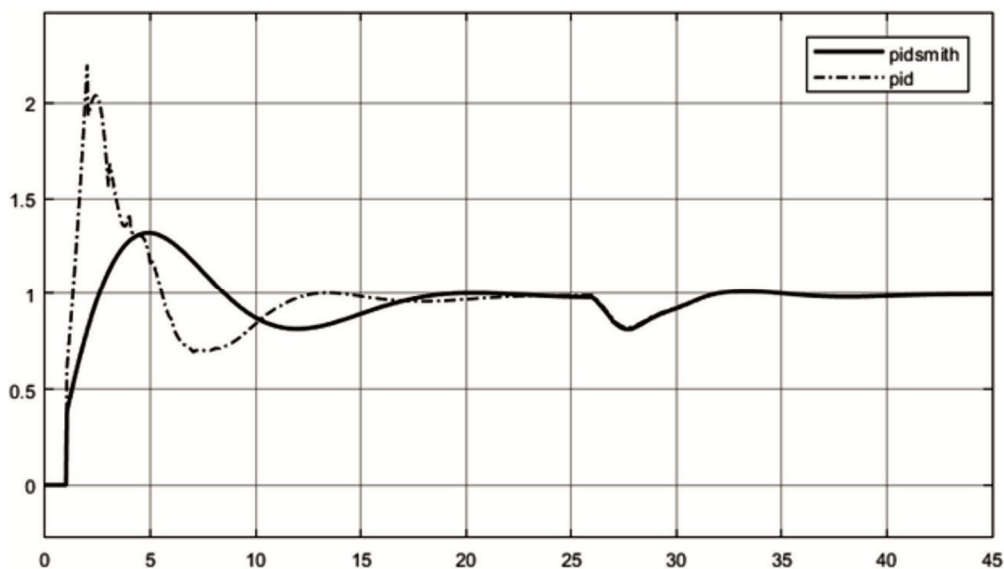


Рисунок 2 – Реакция систем с неустойчивым ОУ  
Figure 2 – The reaction of system with unstable object

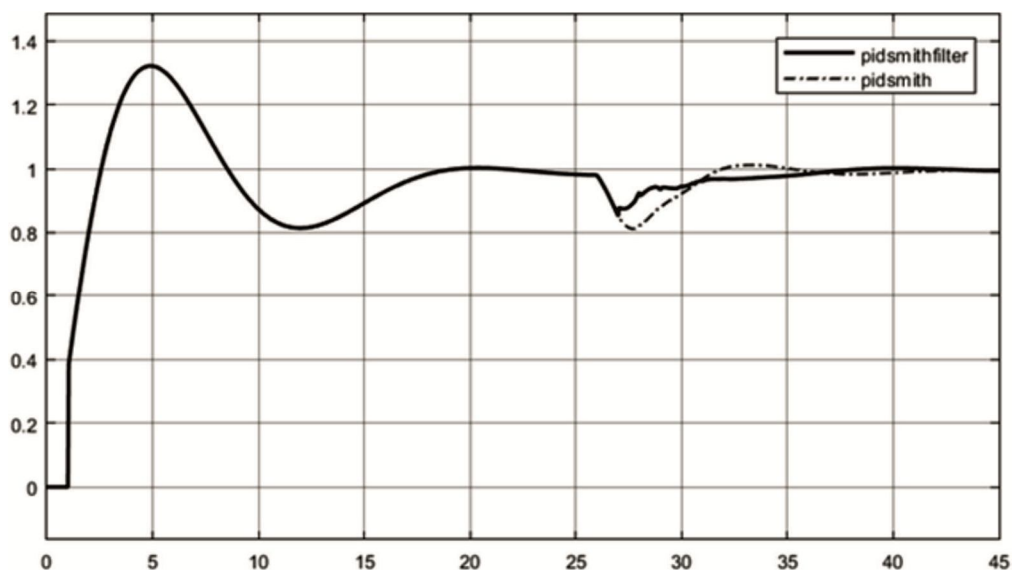


Рисунок 3 – Реакция систем с неустойчивым ОУ  
Figure 3 – The reaction of system with unstable object

Таблица 1 – Сравнительные характеристики систем управления  
Table 1 – Comparative characteristics of control systems

| Оцениваемые характеристики      | Система с ПИД-регулятором | Система с предиктором Смита | Система с предиктором Смита и фильтром |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| Время нарастания                | 13 с                      | 17 с                        | 17 с                                   |
| Влияние возмущающих воздействий | 17 %                      | 17 %                        | 13,5 %                                 |
| Перерегулирование               | 8,8 %                     | %                           | 4 %                                    |

**Пример 2.** В качестве второго примера рассмотрим неустойчивый ОУ с одним устойчивым и одним неустойчивым полюсами. ПФ ОУ имеет вид:  $W(p) = \frac{e^{-0.3p}}{2p^2 + p - 1}$ . Реакция систем на постоянное входное воздействие и возмущающее воздействие  $d(t) = -1 * 1(t - 20)$ , приложенное в момент времени  $t = 20$  с, представлена на рисунке 4. Параметры передаточных функций ПИ-, ПД- и ПИД-регуляторов, описываемых выражениями

$$W_{pd}(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right), W_{pi}(p) = k_f (1 + T_f p),$$

$$W_{pid}(p) = k_p + k_f + \frac{k_p}{T_i p} + k_f T_f p,$$
(12)

были взяты из [12] и имеют следующие значения:  $K_p = 1,398$ ,  $K_i = 0,1026$ ,  $K_f = 3$ ,  $K_d = 1,605$ . Параметры фильтра выбраны как  $Tf1 = 0,1$  с,  $Tf2 = 0,5$  с,  $Tf = 0,01$  с. В таблице 2 представлена сравнительная характеристика полученных выходных сигналов для трех видов систем.

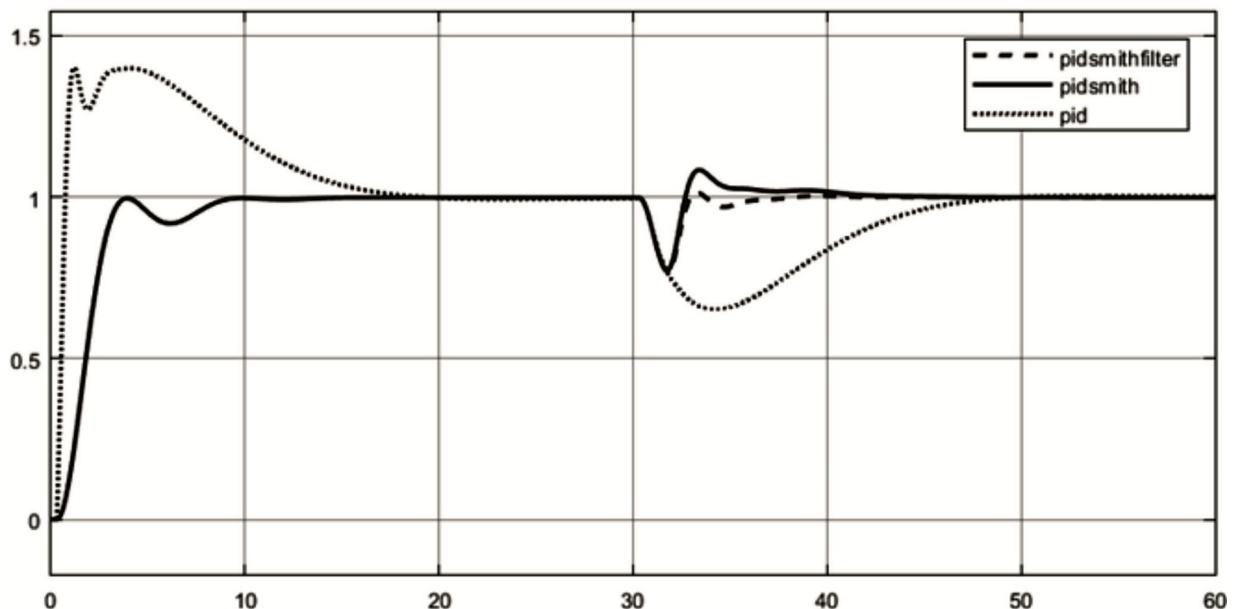


Рисунок 4 – Реакция систем с неустойчивым ОУ  
Figure 4 – The reaction of system with unstable object

Из результатов, показанных в таблице 2, можно сделать вывод, что предлагаемый предиктор Смита позволяет уменьшить перерегулирование относительно входного воздействия системы, но время нарастания уменьшилось на секунду. При этом добавление фильтра значительно снизило влияние возмущающего воздействия на работу системы.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики систем управления  
Table 2 – Comparative characteristics of control systems

| Оцениваемые характеристики      | Система с ПИ-ПД-регулятором | Система с предиктором Смита | Система с предиктором Смита и фильтром |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| Время нарастания                | 11 с                        | 10 с                        | 10 с                                   |
| Влияние возмущающих воздействий | 34 %                        | 25 %                        | 22,5 %                                 |
| Перерегулирование               | 8,2 %                       | 0 %                         | 0 %                                    |

**Пример 3.** Следующий пример неустойчивого ОУ с запаздыванием имеет передаточную функцию вида [11]:  $W(p) = \frac{(0,5639p + 1)e^{-0.1p}}{0,028p^3 + 1,324p^2 - 0,479p + 1}$ . В работе используются следую-

щие параметры ПИД-регулятора:  $K_p = 9,0913$ ,  $K_i = 0,9668$ ,  $K_d = 0,115$ , при этом возмущающее воздействие  $d(t) = -1 * 1(t - 20)$ . Параметры фильтра выбраны как  $Tf1 = 0,3$  с,  $Tf2 = 0,3$  с,  $Tf = 0,01$  с. Реакция систем на постоянное входное единичное воздействие и возмущающее воздействие представлена на рисунках 5 и 6.

Сравнительные характеристики работы систем представлены в таблице 3, откуда видно, что предлагаемый предиктор Смита в значительной степени повышает качество управления системой. Однако, как и в предыдущих примерах, влияние возмущающего воздействия удастся значительно уменьшить только после добавления фильтра.

В итоге можно сделать вывод, что предложенный предиктор Смита позволяет улучшать качество реакции системы на постоянное входное воздействие, в том числе уменьшать перерегулирование и в большинстве случаев снижать время нарастания. Но в то же время добавление фильтра в структуру спроектированного предиктора Смита позволяет снизить влияние возмущающих воздействий, что является достаточно важным фактором в работе систем с запаздыванием.

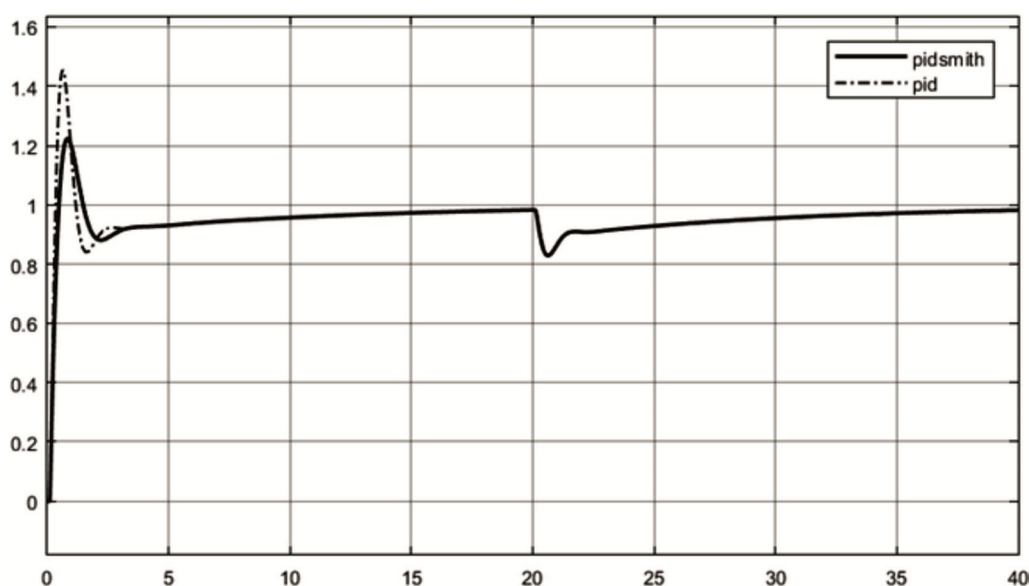


Рисунок 5 – Реакция систем с неустойчивым ОУ  
Figure 5 – The reaction of system with unstable object

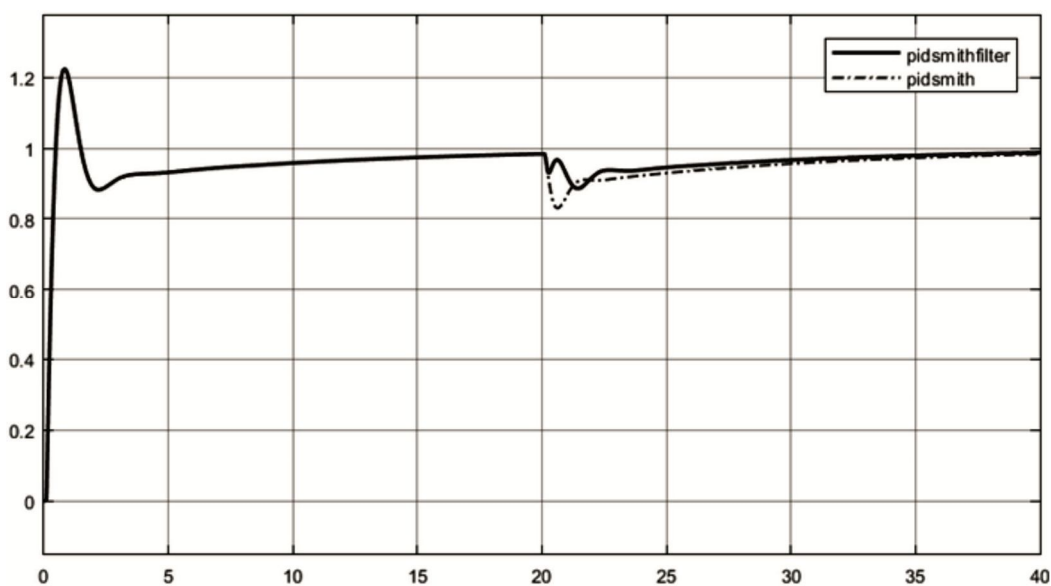


Рисунок 6 – Реакция систем с неустойчивым ОУ  
Figure 6 – The reaction of system with unstable object

**Таблица 3 – Сравнительные характеристики систем управления**  
**Table 3 – Comparative characteristics of control systems**

| <b>Оцениваемые характеристики</b> | <b>Система с ПИД-регулятором</b> | <b>Система с предиктором Смита</b> | <b>Система с предиктором Смита и фильтром</b> |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Время нарастания                  | 10 с                             | 10 с                               | 10 с                                          |
| Влияние возмущающих воздействий   | 15,5 %                           | 15,5 %                             | 11,2%                                         |
| Перерегулирование                 | 45 %                             | 22 %                               | 22 %                                          |

### **Заключение**

В результате была разработана структура нового фильтрованного предиктора Смита для неустойчивых объектов с запаздыванием, который позволяет добавлять в обратную связь дополнительное управляющее устройство. Такая структура, согласно экспериментам, позволяет снизить перерегулирование системы и уменьшить время нарастания. Кроме того, в работе был использован фильтр, структура которого позволяет по сравнению с традиционными подходами заменить единицу в числителе его передаточной функции на более сложное выражение с двумя настраиваемыми параметрами. Подобный фильтр дает возможность снизить влияние возмущающих воздействий на работу системы, что особенно важно при неустойчивых ОУ.

### **Библиографический список**

1. **Johnson M. A. and Moradi M. H.** PID Control: New Identification and Design Methods, chapter 2, Springer, London, UK, 2005.
2. **Panda R. C.** Synthesis of PID controller for unstable and integrating processes. Chemical Engineering Science, vol. 64, no. 12, 2009.
3. **Padhy P. K. and Majhi S.** Relay based PI-PD design for stable and unstable FOPDT processes, Computers & Chemical Engineering, vol. 30, no. 5, 2006.
4. **Marchetti G., Scali C. and Lewin D. R.** Identification and control of open-loop unstable processes by relay methods, Automatica, vol. 37, no. 12, 2001.
5. **Liu T., Zhang W., and Gu D.** Analytical design of two-degree-of-freedom control scheme for open-loop unstable processes with time delay, Journal of Process Control, vol. 15, no. 5, 2005.
6. **Shamsuzzoha M. and Lee M.** Enhanced disturbance rejection for open-loop unstable process with time delay, ISA Transactions, vol. 48, no. 2, 2009.
7. **Chen C. C., Huang H. P. and Liaw H. J.** Set-point weighted PID controller tuning for time-delayed unstable processes, Industrial and Engineering Chemistry Research, vol. 47, no. 18, 2008.
8. **Padma Sree R. and Chidambaram M.** Control of Unstable Systems, Narosa Publishing House, New Delhi, India, 2006.
9. **Normey-Rico J. E. and Camacho E. F.** Control of Dead Time Processes. London, UK: Springer – Verlag Limited, 2007.
10. **Deman Kosale, Dipika Nagle.** Departed time compensator for secure process. – American journal of engineering and technology research, vol. 14, no. 2, 2014.
11. **Kaya Ib.** Simple and optimal PI/PID tuning formulae for unstable time delay process. Electrical and electronics engineering department, Dicle university, Diyarbakir, Turkey, 2015.
12. **Kaya Ib., Atherton D. P.** A new PI-PD Smith predictor for control of processes with long dead time. 14<sup>th</sup> triennial world congress, Beijing, P. R. China. 1999.
13. **Kadhim N. N.** Simple controller approach with Smith predictor for long time delay systems. University of technology control and systems dept., vol. 17, no.2, 2013.
14. **Yin Ch., Gao J., Sun Q.** Enhanced PID Controllers Design Based on Modified Smith Predictor Control for Unstable Process with Time Delay. Mathematical problems in engineering, vol. 2014.
15. **Saxena N., Chidambaram M.** Tuning of PID controllers for delay unstable systems with two unstable poles, IFAC-Papers On Line 49-1, 2016.
16. **Chen Dan and Seborg Dale E.** PI/PID Controller Design Based on Direct Synthesis and Disturbance Rejection. Ind. Eng. Chem. Res., vol. 41, no. 19, 2002.

UDC 681.515

## REFITTING PID REGULATOR FOR UNSTABLE OBJECTS WITH LAGS INTO FILTERED SMITH PREDICTOR

**A. I. Bobikov**, Ph.D. (Tech.), associate professor, department of automation and information technologies in control, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-7440-3118, e-mail: tanya.bubnova.94@mail.ru

**T. S. Bubnova**, postgraduate student, department of automation and information technologies in control, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-7085-0591, e-mail: tanya.bubnova.94@mail.ru

*This article discusses a technique for re-equipment of PID controllers used to control unstable objects with delay into a filtered Smith predictor. **The aim of the work** is to reduce overshoot, increase the speed of control system, and also reduce the influence of disturbing influences on the operation of the system. The article shows how you can choose the parameters of two controllers included in the structure of the Smith predictor in order to obtain a system that is equivalent to a system with a PI controller in terms of response to a disturbance. Such a system provides the best quality indicators when solving the problem of tracking a constant reference input by compensating for the lag achieved using the Smith predictor. To improve the response to the disturbing action, a filter was added to the feedback, the structural features of which, in particular the difference from the unit of its inherent gain, make it possible to reduce the influence of disturbing actions. Modeling was carried out on the example of unstable objects with delay in the Matlab /Simulink package, the presented results show the effectiveness of the proposed design technique.*

*Key words:* object with delay, unstable object, Smith predictor, PID controller, filter.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2020-74-108-118

### References

1. **Johnson M. A. and Moradi M. H.** *PID Control: New Identification and Design Methods*, chapter 2, Springer, London, UK, 2005.
2. **Panda R. C.** Synthesis of PID controller for unstable and integrating processes. *Chemical Engineering Science*, vol. 64, no. 12, 2009.
3. **Padhy P. K. and Majhi S.** Relay based PI-PD design for stable and unstable FOPDT processes. *Computers & Chemical Engineering*, vol. 30, no. 5, 2006.
4. **Marchetti G., Scali C. and Lewin D. R.** Identification and control of open-loop unstable processes by relay methods. *Automatica*, vol. 37, no. 12, 2001.
5. **Liu T., Zhang W., and Gu D.** Analytical design of two-degree of-freedom control scheme for open-loop unstable processes with time delay. *Journal of Process Control*, vol. 15, no. 5, 2005.
6. **Shamsuzzoha M. and Lee M.** Enhanced disturbance rejection for open-loop unstable process with time delay. *ISA Transactions*, vol. 48, no. 2, 2009.
7. **Chen C. C., Huang H. P. and Liaw H. J.** Set-point weighted PID controller tuning for time-delayed unstable processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 47, no. 18, 2008.
8. **Padma Sree R. and Chidambaram M.** *Control of Unstable Systems*. Narosa PublishingHouse, New Delhi, India, 2006.
9. **Normey-Rico J. E. and Camacho E. F.** *Control of Dead Time Processes*. London, UK: Springer – Verlag Limited, 2007.
10. **Deman Kosale, Dipika Nagle.** Departed time compensator for secure process. *American journal of engineering and technology research*, vol. 14, no. 2, 2014.
11. **Kaya Ib.** Simple and optimal PI/PID tuning formulae for unstable time delay process. *Electrical and electronics engineering department*. Dicle university, Diyarbakir, Turkey. 2016.
12. **Kaya Ib., Atherton D. P.** A new PI-PD Smith predictor for control of processes with long dead time. *14<sup>th</sup> triennial world congress*, Beijing, P. R. China. 1999.

13. **Kadhim N. N.** Simple controller approach with Smith predictor for long time delay systems. *University of technology control and systems dept.*, vol. 17, no. 2, 2013.
14. **Yin Ch., Gao J., Sun Q.** Enhanced PID Controllers Design Based on Modified Smith Predictor Control for Unstable Process with Time Delay. *Mathematical problems in engineering*, vol. 2014.
15. **Saxena N., Chidambaram M.** Tuning of PID controllers for delay unstable systems with two unstable poles, *IFAC-Papers On Line* 49-1, 2016.
16. **Chen Dan and Seborg Dale E.** PI/PID Controller Design Based on Direct Synthesis and Disturbance Rejection. *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 41, no. 19, 2002.