



## ПРЕДИКТОР СМИТА В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ С ЦИФРОВЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

В.Л. Бажанов (СамГУПС)

Статья продолжает тему совершенствования замкнутых систем авторегулирования как важнейшего компонента АСУТП. Экспериментально доказывается, что предиктор Смита является эффективным средством повышения качества управления запаздывающими объектами, а также объектами высоких порядков. Изложен принцип работы и настройки регулятора, работающего с использованием предиктора. Показано, что цифровые регуляторы хорошо приспособлены для установки в них опции предиктора Смита. Предлагаются для использования экспериментально проверенные варианты программной реализации предиктора для программируемых контроллеров и ПИД-регуляторов общепромышленного применения.

**Ключевые слова:** замкнутая САР, объекты управления с запаздыванием, показатели качества управления, предиктор Смита, прогнозирующая математическая модель, опция предиктора в цифровых регуляторах, настройка регуляторов с предиктором.

Общеизвестно, что задержанная реакция объекта управления (ОУ) на управляющие воздействия регулятора неизбежно ухудшает качество работы замкнутой системы автоматического регулирования (САР). Факт вполне понятный и объяснимый. В самом деле, любые усилия регулятора, направленные против действующих на ОУ возмущений, остаются в течение некоторого времени  $t_z$  (времени задержки или запаздывания) совершенно безрезультатными. При этом возмущения продолжают свое вредное воздействие на объект и все дальше уводят его от желаемого состояния. Чем продолжительнее запаздывание, тем больше становится ошибка управления.

Дополнительные трудности при управлении запаздывающим объектом создает эффект дезинформации, возникающий из-за отсутствия ожидаемой реакции объекта на правильно сформированное регулятором управление. Это провоцирует регулятор на дополнительные, более резкие воздействия, чаще всего уже ошибочные, которые потом невозможно отменить. Их последствия неотвратимы. Попытки исправления приводят к новым, еще более грубым ошибкам. В результате система автоуправления идет вразнос.

Теория автоматического управления наглядно демонстрирует вредное влияние запаздывания у ОУ на устойчивость замкнутой системы "накручивая" ее амплитудно-фазовую характеристику (АФХ) вокруг начала координат комплексной плоскости. Она же (теория) говорит о том, что чем больше величина запаздывания у объекта, тем осторожнее должны быть действия регулятора и тем труднее рассчитать его оптимальные параметры настройки.

В связи с этим заслуживает серьезного внимания идея, указывающая на возможность повысить качество работы замкнутых САР с запаздывающими объектами, а заодно облегчить процедуру настройки регуляторов в таких системах. Идея, вообще говоря, достаточно очевидная, если внимательнее всмотреться в

сущность явления запаздывания. Действительно, запаздывающий ОУ можно представить в виде комплекса, состоящего из двух компонентов, последовательно соединенных между собой. Первый из них — это звено задержки, через которое в течение времени запаздывания  $t_z$  "проходит" каждая поданная регулятором управляющая команда, прежде чем она окажет воздействие на второй компонент — незапаздывающую часть объекта. Общая картина представлена на рис. 1.

$$W(p)^z = W(p) \cdot e^{-p \cdot t_z}, \quad (1)$$

где  $W(p)^z$  — передаточная функция запаздывающего ОУ,  $W(p)$  — передаточная функция незапаздывающей части объекта,  $t_z$  — время запаздывания.

Согласно структуре, представленной на рис. 1, управление, формируемое в текущий момент регулятором, достигает незапаздывающей части объекта  $W(p)$  спустя время  $t_z$ . Естественно, управление должно соответствовать тому состоянию объекта, в котором он окажется в будущем, удаленном на время запаздывания. Чтобы сформировать такое соответствующее управление, регулятору необходимо знать будущее состояние объекта. Иначе говоря, ему нужен прогноз на период  $t_z$ . При этом вырабатывать управление регулятор должен в расчете на незапаздывающий объект  $W(p)$ .

Возможен ли в принципе такой прогноз? Ответ положительный. Для осуществления прогноза требуются:

1. Сведения о текущем состоянии ОУ;
2. Информация об управляющих воздействиях, которые поступят из звена задержки объекта на его незапаздывающую часть в течение периода прогнозирования  $t_z$ ;

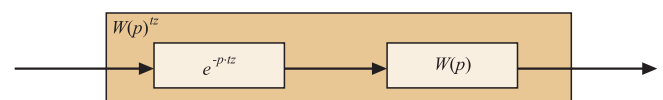


Рис. 1. Структура объекта управления с запаздывающей реакцией на управляющие воздействия регулятора

3. Математическая модель запаздывающей части объекта управления.

Необходимо, конечно, и еще одно — вычислительное устройство (процессор).

Все перечисленное, кроме математической модели, естественным образом присутствует в традиционном цифровом (микропроцессорном) регуляторе. Так сведения о текущем состоянии ОУ поставляются датчиком регулируемой переменной. Управляющие воздействия, которыми заполнено звено задержки объекта, сформированы самим регулятором в течение последнего периода времени  $t_z$ . Поэтому они ему хорошо известны. Нужно их только запомнить. Для этого у цифровых регуляторов есть память. Наконец, вычислительное устройство (процессор) — это обязательный атрибут каждого цифрового регулятора.

Для расчета прогноза должна быть выбрана математическая модель запаздывающей части объекта управления и установлена в регулятор в виде программного модуля. В смысле технической осуществимости — это обычная процедура. Подробнее о математической модели пойдет речь несколько позже. А пока очевидно одно — для достоверного прогноза нужна достаточно точная математическая модель.

Принято считать, что примерно в 50-х годах XX века идею управления запаздывающими объектами с предсказанием их будущего состояния сформулировал и закрепил за собой некто г-н Смит. Будучи реализованной на аналоговой технике, идея тогда не получила распространения. Но с того времени устройство предсказания состояния ОУ на время запаздывания  $t_z$  получило название "предиктор Смита". Будем придерживаться этого названия.

Предиктор реализуется в цифровом регуляторе в виде программной опции. Действия регулятора, использующего предиктор, сводятся к следующему. Регулятор с установленной периодичностью считывает показания с датчика регулируемой переменной. Эту информацию использует программный модуль (собственно предиктор), который на основе математической модели запаздывающей части ОУ  $W(p)$  и хранящейся в памяти предыдущий поданных на ОУ воздействий, рассчитывает прогноз состояния регулируемой переменной на время запаздывания  $t_z$ . Результат прогноза передается другому программному модулю, реализующему закон управления (например, ПИД-закон). Здесь на основе спрогнозированного состояния объекта рассчитывается управляющее воздействие. Оно выдается на ОУ и заносится в стековую память регулятора для возможности дальнейшего прогноза.

ОУ начнет реагировать на полученное воздействие спустя время запаздывания. Следовательно, и по времени, и по величине оно придется "в самую пору". Разумеется, при условии, что прогноз был достоверным. Здесь следует еще раз подчеркнуть, что регулятор с предиктором должен быть настроен так, будто он управляет объектом, не имеющим запаздывания. И это очевидный "плюс", поскольку методики настройки ре-

гуляторов в САР с объектами без запаздывания существенно проще и лучше отработаны. Таким образом, реализация идеи предиктора Смита дает основание рассчитывать на два преимущества, а именно:

1. На улучшение показателей качества работы замкнутой САР с запаздывающим объектом;
2. На более простой и достоверный расчет параметров настройки регулятора (по методикам, применимым к запаздывающим объектам).

#### Аспекты практической реализации предиктора Смита

Эффект от применения предиктора зависит от ряда факторов, влияющих на точность прогноза состояния ОУ. Основными среди них являются:

- достоверность информации о текущем значении регулируемой переменной;
- адекватность используемой в предикторе математической модели реальному ОУ, а точнее его запаздывающей части.

На практике и первое, и второе неизбежно содержит погрешности. Это значит, что абсолютно точный прогноз невозможен в принципе. И, разумеется, точность прогноза объективно снижается с увеличением времени запаздывания (чем долгосрочнее прогноз, тем он менее точен). Ошибки в прогнозе дезинформируют регулятор и обрекают его на ошибочные действия. Естественно предположить, что предиктор будет улучшать работу системы управления, пока погрешность прогноза не окажется больше некоторой допустимой величины. Плохо прогнозирующий предиктор может оказаться вреднее, чем его отсутствие.

Неизбежность погрешностей в информации от датчика регулируемой переменной и реальной неадекватности математической модели в предикторе всегда будут ограничивать интервал времени  $[0; t_z^{don}]$ , на котором обеспечивается требуемая точность прогноза. Если запаздывание у объекта управления не превышает величины  $t_z^{don}$ , то можно рассчитывать на положительный эффект от применения предиктора. В обратном случае предсказать последствия трудно.

Расширить диапазон эффективной работы предиктора  $[0; t_z^{don}]$  позволяют меры, повышающие достоверность информации от датчика регулируемой переменной. На практике наибольшие затруднения создают случайные помехи в линиях связи датчика с регулятором, а также нестабильность младших разрядов АЦП при оцифровке аналоговых сигналов. Обычно проблема решается с помощью цифровых фильтров. Но иногда применение традиционных фильтров оказывается не достаточно результативным. Причина в том, что, подавляя помехи, фильтры одновременно искажают и полезный (информационный) сигнал. Это отражается на точности прогноза, и снижает эффективность предиктора. Добиться лучших результатов в борьбе с помехами позволяют цифровые фильтры с процедурой восстановления, разработанные и исследованные в НПП "ПОРА-USWO" (<http://uswo.lgg.ru>).

Особого внимания заслуживает вопрос выбора математической модели для предиктора Смита. Как уже отмечалось, точность (адекватность) модели определяет достоверность прогноза и его долгосрочность  $[0; t_z^{don}]$ . Объекты управления со сложной динамикой, как правило, описываются математическими моделями громоздкого вида с большим числом параметров. Применимы ли такие модели в предикторе? В принципе, да. Однако идентификация этих моделей на конкретных объектах управления требует ощутимых затрат времени, а главное, специальной подготовки, которой просто нет у большинства наладчиков систем авторегулирования. К этому следует добавить, что расчет прогноза по сложной модели будет занимать больше времени в каждом рабочем цикле регулятора. Это может плохо повлиять на способность регулятора качественно управлять быстрыми (малоинерционными) объектами. Вероятно, существуют такие ситуации, в которых окажется оправданным использование в предикторе сложной, но зато более точной математической модели. Например, при управлении особо ответственными объектами.

Что касается предиктора для универсальных регуляторов массового применения, то в нем предпочтительна единая, легко идентифицируемая математическая модель с небольшим числом параметров. Настройка такого предиктора должна:

- быть доступной для специалистов с традиционной подготовкой;
- не требовать обременительно больших затрат времени.

Очевидно, что за обладание такими возможностями придется расплатиться точностью модели, а значит, достоверностью прогноза и сокращением диапазона эффективной работы предиктора  $[0; t_z^{don}]$ .

В целях разработки опции предиктора Смита для цифровых ПИД-регуляторов общепромышленного применения в НПП "ПОРА-USWO" был исследован ряд математических моделей. Наиболее удачными по совокупности показателей оказались два вида моделей, легко идентифицируемых по экспериментально снятым кривым разгона объектов управления:

$$W(p) = \frac{K_0}{p^n}, n = 2; 3; \dots, \quad (2)$$

$$W(p) = \frac{K}{p(Tp + 1)}. \quad (3)$$

Переходные характеристики моделей (2) и (3) (реакция на ступеньку "U" при нулевых начальных условиях) описываются соответственно выражениями:

$$x(t) = \frac{K_0 \cdot p^n}{n!} \cdot U, \quad (4)$$

$$x(t) = K \cdot U \cdot [t - T(1 - e^{-\frac{t}{T}})]. \quad (5)$$

Значения параметра  $K_0$  в модели (2), а также параметров  $K$  и  $T$  в модели (3) выбираются так, чтобы выражения (4) или (5) с наибольшей точностью описывали начальный участок запаздывающей части

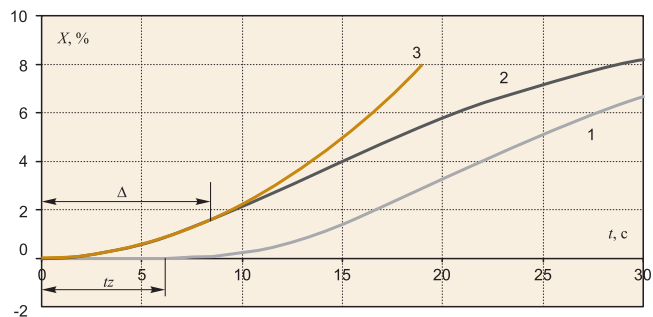


Рис. 2

1 – кривая разгона ОУ с запаздыванием  $t_z$ ; 2 – кривая разгона ОУ без учета запаздывания; 3 – переходная характеристика математической модели предиктора;  $\Delta$  – участок удовлетворительного совпадения кривых 2 и 3

кривой разгона объекта управления. Этим обеспечивается адекватность объекта и математической модели предиктора. Чем больше участок удовлетворительного совпадения кривой разгона и переходной характеристики  $\Delta$  (рис. 2), тем больше диапазон эффективной работы предиктора  $[0; t_z^{don}]$ .

В дальнейшем эксперименты подтвердили надежное повышение качества работы замкнутых систем, благодаря использованию предиктора, если объекты управления имели запаздывание  $t_z$ , не превышающее значения  $\Delta$ , то есть при выполнении условия:

$$t_z \leq \Delta. \quad (6)$$

Модель (2) имеет всего один параметр  $K_0$ . Поэтому ее идентификация по кривой разгона выполняется наиболее просто. Модель (3) чуть сложнее, у нее два параметра  $K$  и  $T$ . Однако они имеют ясную геометрическую интерпретацию на изображении переходной характеристики. Поэтому сложность процедуры идентификации модели (3) по сравнению с моделью (2) возрастает минимально. При этом на многих объектах модель (3) выигрывает по величине участка совпадения кривой разгона и переходной характеристики  $\Delta$ .

Решение вопроса идентификации моделей (2) и (3) предельно упрощает прикладная программа визуальной аппроксимации VAPW, разработанная в НПП "ПОРА-USWO". Она позволяет зрительно оценивать точность аппроксимации и размер зоны совпадения  $\Delta$ , полностью освобождает пользователя от выполнения вычислений, сокращает затрачиваемое на работу время.

В НПП "ПОРА-USWO" разработаны программные реализации предиктора Смита на основе математических моделей (2) и (3). Они установлены в цифровые регуляторы с ПИД и USWO законами управления. Это открыло возможность экспериментальной оценки эффективности предиктора в разнообразных практических приложениях.

Удобным инструментом для исследований, (особенно на начальном этапе) оказался компьютерный имитатор объектов управления, работающий в режиме РВ [1]. Он предназначен для подключения регуляторов различных модификаций со стандартными входными/выходными сигналами. Имитатор реаги-

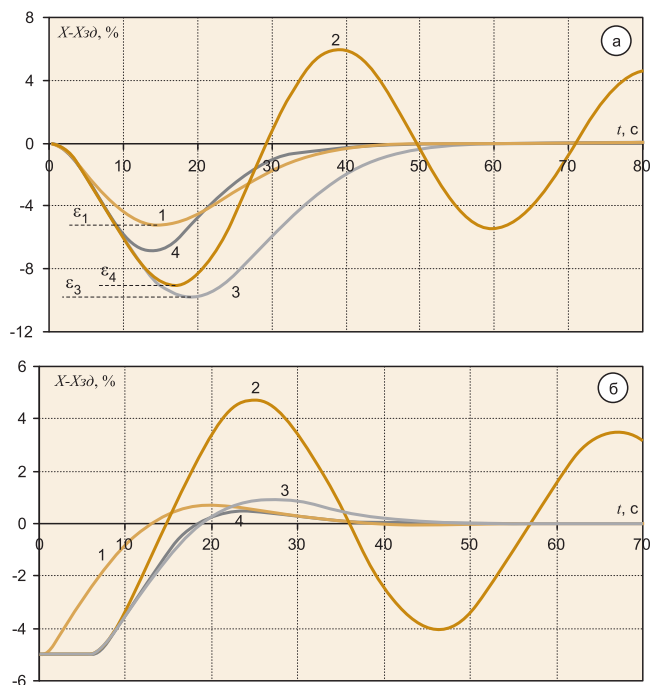


Рис. 3. Переходные процессы в замкнутой системе авторегулирования  
 а – при действии внешнего возмущения  $DH = 20\%$ ; б – при увеличении задания регулятору на  $5\%$ ; 1 – объект без запаздывания (8), настройки регулятора (9); 2 – объект с запаздыванием (10), настройки регулятора прежние (9); 3 – объект с запаздыванием (10), регулятор без предиктора с настройками (11); 4 – объект с запаздыванием (10), регулятор с предиктором с настройками (9)

рует на воздействия регулятора, на заданные возмущения и воспроизводит в РВ поведение широкого класса объектов управления, описываемых передаточной функцией общего вида:

$$W(p) = \frac{k \cdot e^{-p \cdot tz}}{p^r \cdot \prod_{i=1}^m (T_i \cdot p + 1)}, \quad r, m = 0; 1; 2; \dots \quad (7)$$

Для имитации желаемого объекта управления пользователь должен ввести конкретные значения параметров  $k, T_i, tz, r, m$  в передаточной функции (7).

Чтобы получить наглядное представление о влиянии запаздывания  $tz$  на работу замкнутых САР, а также об эффекте от использования установленной в ПИД-регулятор опции предиктора Смита, лучше всего обратиться к конкретным примерам.

На рис. 3а показаны переходные процессы в замкнутой системе при действии на вход ОУ возмущения  $DH=20\%$  в виде ступеньки, ( $DH$  измеряется в процентах от полного диапазона управляющих воздействий регулятора). На рис. 3б приведены переходные процессы в той же САР при увеличении задания регулятору на  $5\%$ .

Кривые 1 показывают работу системы с объектом управления, не имеющим транспортного запаздывания, описываемым передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{1,2}{(13p+1)(8p+1)} \quad (8)$$

Это объект второго порядка с самовыравниванием. Для ПИД-регулятора в системе выбраны следующие параметры настройки

$$Kp = 2,5; \quad Tu = 14 \text{ с}; \quad Td = 2 \text{ с}. \quad (9)$$

Они обеспечивают аperiодический характер переходных процессов в контуре управления, а в случае изменения задания регулятору допускают первый выбег, не превышающий  $20\%$ .

Кривые 2 на рис. 3а и 3в показывают, как при неизменных настройках ПИД-регулятора (9) поведет себя замкнутая САР, если у объекта (8) появится сравнительно небольшое запаздывание  $tz = 6 \text{ с}$ . Соответственно поменяется вид его передаточной функции:

$$W(p)^z = \frac{1,2 \cdot e^{-6p}}{(13p+1)(8p+1)} \quad (10)$$

Видно, что запаздывание сделало качество работы системы неприемлемым. Процессы в ней стали чрезмерно колебательными. Таков эффект, произведенный запаздыванием.

Чтобы восстановить прежний характер процессов в САР (кривые 3) потребовалось определить и установить новые параметры настройки ПИД-регулятора:

$$Kp = 1,48; \quad Tu = 17,8 \text{ с}; \quad Td = 4,5 \text{ с}. \quad (11)$$

Сопоставление кривых 1 и 3 дает представление о том, как возрастают динамические ошибки регулирования и продолжительность процессов в системе, когда у ОУ появляется запаздывание (при условии, что предиктор не применяется).

Остается посмотреть, что получится, если при управлении запаздывающим объектом (10) воспользоваться опцией предиктора Смита (построенной на основе прогнозирующей модели (3)).

С помощью уже упоминавшейся программы VARW по кривой разгона незапаздывающего объекта (8) была проведена идентификация математической модели (3) и определены ее параметры:

$$T = 4,3 \text{ с}; \quad K = 0,05. \quad (12)$$

На рис. 4 видно, что переходная характеристика математической модели (3) с параметрами (12) достаточно точно совпадает с кривой разгона объекта (8) на начальном участке  $\Delta \approx 11 \text{ с}$ .

Значения параметров (12) и время запаздывания объекта  $tz = 6 \text{ с}$  были введены в ПИД-регулятор для использования в опции предиктора. ПИД-регулятору выставлены параметры настройки (9) (как при управлении незапаздывающим объектом (8)).

Как заработала система, показывают кривые 4 на рис. 3а и 3б. Сравнение их с кривыми 1 убеждает, что, несмотря на запаздывание, характер процессов в системе, благодаря предиктору, получился практически таким же, как в САР с незапаздывающим объектом (8). Максимальная динамическая ошибка управления  $\epsilon_4$  при обработке возмущения  $DH$  несколько возросла по сравнению с  $\epsilon_1$ . Это неизбежное следствие

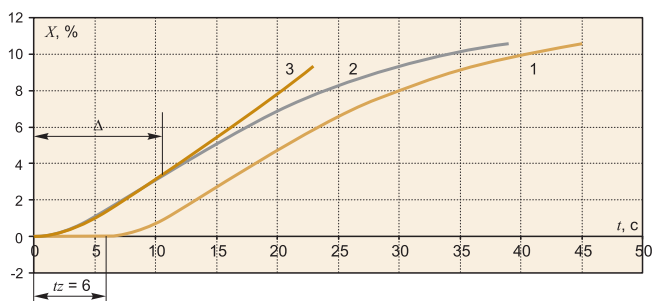


Рис. 4  
1 – кривая разгона объекта управления (10); 2 – кривая разгона незапаздывающей части ОУ; 3 – переходная характеристика прогнозирующей мат. модели (3)

запаздывания. Но важно, что по сравнению с ошибкой  $\epsilon_3$  (кривая 3) она получилась примерно на 30% меньше. Сократилось и время регулирования. Таков эффект от использования предиктора Смита.

Следует отметить, что в приведенном примере время запаздывания у ОУ (10) удовлетворяет условию (6), то есть меньше величины  $\Delta$ , показанной на рис. 4. Как и ожидалось в таком случае, математическая модель в предикторе смогла обеспечить достаточную точность прогноза, о чем и свидетельствуют представленные результаты.

Узнать, как меняется картина при увеличении времени запаздывания у ОУ, в том числе, когда нарушается условие (6), можно на сайте <http://uswo.lgg.ru>. Там же имеются примеры использования предиктора на объектах управления других типов.

Второй пример приводится с целью показать, что с помощью предиктора Смита можно ощутимо повысить качество работы замкнутых САР с объектами управления высокого порядка. Идея использования предиктора в таком направлении объясняется тем, что задержанная начальная реакция объектов высокого порядка на управляющие воздействия регулятора очень напоминает запаздывание.

Итак, рассматривается САР с объектом управления пятого порядка, обладающим астатизмом первой степени. Его передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{0,012}{p(10p+1)(8p+1)(6p+1)(5p+1)}. \quad (13)$$

Для управления объектом (13) в системе используется ПИД-регулятор с параметрами настройки:

$$Kp = 2,5; Tu = 100 \text{ с}; Td = 11 \text{ с}. \quad (14)$$

Оценить качество работы такой системы позволяют графики переходных процессов, представленные на рис. 5 а и 5б (кривые 1).

Чтобы применить в данной системе предиктор и оценить его эффект, нужно обратиться к кривой разгона объекта (13). Она представлена кривой 1 на рис. 6.

Начальный участок кривой разгона  $[0;10 \text{ с}]$ , где ОУ практически не реагирует на входную ступеньку, можно условно принять за запаздывание, то есть  $tz = 10 \text{ с}$ . (15)

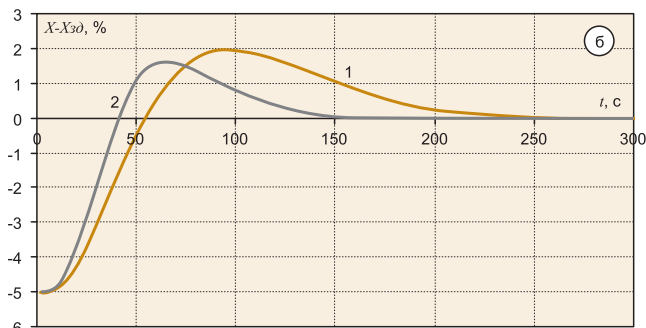
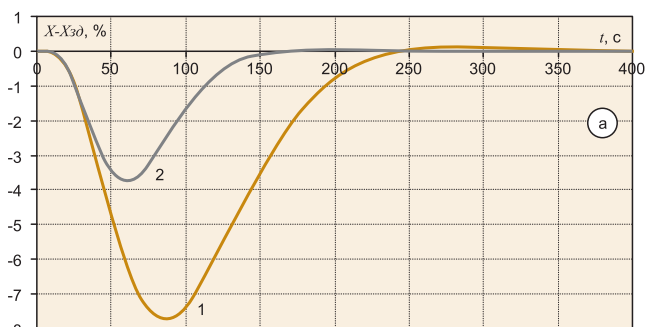


Рис. 5. Переходные процессы в замкнутой САР с объектом управления 5-го порядка (13)  
а – при действии внешнего возмущения  $DH = 20\%$ ; б – при увеличении задания регулятору на 5%; 1 – без использования предиктора; 2 – с применением предиктора Смита

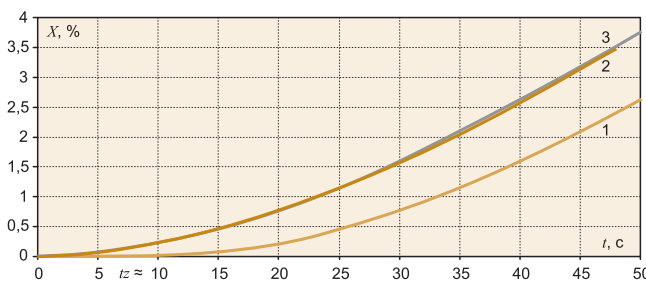


Рис. 6  
1 – кривая разгона объекта управления (13); 2 – кривая разгона незапаздывающей части ОУ; 3 – переходная характеристика прогнозирующей мат. модели (3)

Оставшийся участок кривой разгона будет характеризовать незапаздывающую часть ОУ. Перемещенный в начало координат он превращается на рис. 6 в кривую разгона 2. По этой кривой нужно идентифицировать прогнозирующую математическую модель предиктора. Это легко делает программа визуальной аппроксимации VARW. Она вычисляет параметры идентификации прогнозирующей математической модели (3), при которых переходная характеристика модели (кривая 3) хорошо совпадает с кривой разгона 2.

$$T = 32 \text{ с}; K = 0,015. \quad (16)$$

Значения (16) и величина условного запаздывания (15) вводятся в регулятор. Этого достаточно для работы предиктора.

Остается определить и установить параметры настройки ПИД-алгоритма на основе кривой разгона условно незапаздывающего объекта управления (кри-

вая 2 на рис. 6). Для этого можно воспользоваться любым из известных методов расчета настроек ПИД-регулятора. По мнению специалистов НПП "ПОРА-USWO" наиболее удобным и надежным является метод масштабирования (ММ) [2]. Применение ММ в рассматриваемом примере дает следующий результат:

$$Kp = 5; Ti = 60 \text{ с}; Td = 10 \text{ с}. \quad (17)$$

Судить о работе системы позволяют графики, представленные на рисунках 5а и 5б. Кривые 2 – это процессы в замкнутой САР с объектом управления (13) и ПИД-регулятором с настройками (17), использующим опцию предиктора Смита. Сравнение кривых 1 и 2 позволяет оценить эффект от применения предиктора. Он, безусловно, положительный, а главное, весьма существенный, способный представлять интерес для практики.

#### Выводы

1. Предиктор Смита является эффективным средством повышения качества работы замкнутых САР с запаздывающими ОУ и объектами высоких порядков. На данный момент имеется необходимый опыт, позволяющий реально улучшать работу автоматики на производственных предприятиях за счет использования предиктора.

2. Технические возможности современных цифровых регуляторов вполне достаточны для полноценной реализации предиктора Смита в виде программной опции.

3. Применение предиктора позволяет упростить расчет оптимальных настроек ПИД-регуляторов на запаздывающих объектах и уменьшает затраты времени на наладку систем авторегулирования.

4. Для цифровых регуляторов массового (общепромышленного) применения необходимы простые и удобные в употреблении реализации предиктора Смита, способные работать на запаздывающих объектах управления различного типа. Разработанные в НПП "ПОРА-USWO" и прошедшие экспериментальную проверку универсальные программные реализации предиктора отвечают этим требованиям, и могут быть использованы производителями средств автоматизации для установки в серийно выпускаемые цифровые контроллеры.

Широкое и успешное внедрение предиктора Смита на промышленных объектах станет возможным при наличии на предприятиях подготовленного соответствующим образом персонала. В помощь специалистам, желающим быстро овладеть навыками использования предиктора Смита на практике, в Самарском государственном университете путей сообщения организованы курсы "Школы практической автоматики". Предлагается содействие высшим и средним учебным заведениям, выпускающим специалистов по системам автоматизации, в постановке изучения предиктора Смита и других специальных разделов учебной программы.

#### Список литературы

1. *Бажанов В.Л.* Функция самонастройки по методу масштабирования для цифровых регуляторов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. № 12.
2. *Бажанов В.Л.* Метод масштабирования – эффективный инструмент для практической настройки регуляторов в замкнутых САР // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 6.

*Бажанов Владимир Леонидович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте" Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС).*

*Контактный телефон (927) 760-28-84.*

*E-mail: uswo@samtel.ru; tklinkov@mail.ru http://uswo.lgg.ru*

## УПРАВЛЕНИЕ АПЕРИОДИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

### ИМПУЛЬСНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ЛЮФТА

**А.М. Шубладзе (ИПУ РАН), С.И. Кузнецов (ОАО "НИИТеплоприбор"),  
Н.М. Бобриков, И.К. Денисов (ОАО "Газавтоматика"),  
С.В. Гуляев, В.Р. Ольшванг, В.А. Малахов (ИПУ РАН)**

*Проводится сравнение работы предлагаемого импульсного регулятора, в котором заложен способ автоматического определения и компенсации люфта, с работой импульсного регулятора без компенсации люфта при управлении аperiodическим объектом. Демонстрируются существенные преимущества предлагаемого регулятора.*

*Ключевые слова: регулятор, минимизация числа изменений, квантование, дискретный элемент.*

Институтом проблем управления РАН совместно с ОАО "НИИТеплоприбор" и ОАО "Газавтоматика" (Москва) разработан на основе ПИД регулятора промышленный импульсный регулятор с минимизацией числа изменений его выходного сигнала – ПИДмл регулятор, в котором осуществляется идентификация и компенсация отрицательного влияния изменяющегося во времени люфта. ПИДмл регулятор предназначен для

применения в локальных АСУТП в теплоэнергетике, атомной, нефтегазовой и нефтехимической и других отраслях промышленности, где имеет место сравнительно высокий износ исполнительных органов, сочетающийся с появлением люфта в кинематических связях от исполнительного органа к объекту управления.

На практике при построении АСУТП наиболее часто применяются ПИД регуляторы, выходной сиг-