



ВВЕДЕНИЕ

В октябре 2013 г. в рамках деловой программы международной специализированной выставки «Автоматизация-2013» (Санкт-Петербург) прошел итоговый семинар конкурса научно-технических статей «Автоматизация в промышленности: опыт применения». Конкурс учрежден выставочным объединением «ФАРЭКСПО» — организатором международной специализированной выставки «Автоматизация» (Санкт-Петербург) и журналом «Автоматизация в промышленности» — генеральным информационным партнером международной специализированной выставки «Автоматизация».

В конкурсную комиссию вошли независимые специалисты, работающие в области промышленной автоматизации. Возглавил конкурсную комиссию д-р техн. наук, проф. Э.Л. Ицкович.

В подобном формате конкурс статей проводился уже третий раз, и второй раз по теме — опыт применения. Важность данной темы объясняется тем, что в ходе выполнения проектов по автоматизации производств возникают различного рода сложности, характерные для целой отрасли, или индивидуальные, связанные с особенностями конкретного предприятия. И эти трудности приходится преодолевать. Кроме того, далеко не всегда использование уже реализованной системы автоматизации приносит предприятию реальный экономический эффект. Поэтому в статьях, посвященных опыту, недостаточно привести перечень программных и технических средств, использованных в проектах, с описанием их положительных характеристик, структурные схемы реализованной системы и констатировать факт ввода системы в эксплуатацию. Реальную ценность для специалистов имеют статьи, правдиво описывающие проект автоматизации от этапа выбора средств и систем автоматизации до ввода системы в эксплуатацию, мотивации персонала предприятия для обучения и последующей работы с этой системой, оценки экономической эффективности.

Статьи, в которых в максимальной степени были отражены все перечисленные аспекты, стали лауреатами конкурса 2013 г. и были награждены памятными дипломами.

Дипломы I степени присуждены статьям:

1. *Бажанов В.Л.* «Предиктор Смита для универсальных цифровых регуляторов» (Самарский государственный университет путей сообщения);

2. *Маликов Т.Б., Потапкин М.О., Самусь С.В.* (ФГУП НИТИ им. А.П. Александрова), *Зозуля В.М.* (ОАО «КБСМ»), *Симонов В.Н.* (Филиал концерна Росэнергоатом «Ленинградская АЭС») «Создание автоматизированной системы подготовки МБК с ОЯТ НА Ленинградской АЭС».

Дипломы II степени присуждены статьям:

1. *Кремез А.С.* (ЗАО «НЕЙРОКОМ») «Опыт разработки и применения компьютерных методов профессиональной психологической подготовки операторов транспортных систем»;

2. *Якушкина Л.А.* (Компания «Институт типовых решений — Производство» (ИТРП)) «Автоматизация процесса расчета себестоимости продукции на машиностроительном предприятии ЗАО «Метиз»».

Дипломы III степени присуждены статьям:

1. *Кудинов А.В., Марков Н.Г.* (Национальный исследовательский Томский политехнический университет), *Капилович О.Л.* (ОАО «Востокгазпром») «Оценки эффективности процесса внедрения MES в нефтегазодобывающей компании»;

2. *Сырков А.В.* (ОАО «Трансмост») Пути развития автоматизированных систем эксплуатации и содержания автодорожных искусственных сооружений.

Специальный приз «Качественное образование» получила статья:

Елизаров В.Н., Мариалов А.А. (СПбГУАП) «Многокомпонентная система дозирования: решения по модернизации с использованием виртуальных инструментов».

Поздравляем лауреатов конкурса научно-технических статей «Автоматизация в промышленности: опыт применения», желаем им дальнейших творческих успехов и интересных проектов.

ПРЕДИКТОР СМИТА ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

В.Л. Бажанов (Самарский государственный университет путей сообщения)

Статья предназначена для читателей, преследующих разные интересы. Желаящим «войти в тему» она кратко расскажет о назначении предиктора Смита о том, как он работает и какая от него польза. Тот, кто уже слышал о предикторе и хотел бы ясно представлять, как им воспользоваться на практике, сможет подробно узнать об этом из приведенного в статье примера. Описанный успешный опыт разработки предиктора Смита, накопленный в НПП «ПОРА-USWO», может оказаться полезным тем, кто хотел бы установить опцию предиктора в собственные цифровые регуляторы.

Ключевые слова: замкнутая система управления, запаздывающая реакция объекта, качество управления, предиктор Смита, прогнозирующая модель, настройка регулятора, эффект от предиктора.

Введение

Объекты с задержанной (запаздывающей) реакцией на управляющие воздействия регулятора всегда доставляли и в дальнейшем будут доставлять неприятности разработчикам систем автоматического управления. Запаздывание неизбежно снижает качество работы систем замкнутой структуры, реализующих принцип управления «по отклонению». Это известный и легко объяснимый факт.

Потери качества управления, обусловленные запаздыванием, при оптимальной настройке регулятора сокращаются до минимального уровня. Этот уровень характеризует величину объективных потерь. К сожалению, во многих приложениях даже этот минимум оказывается неприемлемо высоким.

Ситуацию усугубляет отсутствие простых и достаточно точных методик определения оптимальных параметров настройки регуляторов на запаздывающих

объектах. Из-за этого на практике регуляторы чаще всего настраиваются, мягко говоря, неоптимально. В результате к объективным потерям качества управления добавляются субъективные. Их уровень непредсказуем.

В связи с этим проблема качественного управления запаздывающими объектами всегда сохраняла актуальность и остроту. Для ее решения применялись разные подходы. Соответственно и результативность также была разной. Один из известных подходов представляется наиболее перспективным. Он предполагает установку в управляющий регулятор предсказателя состояния запаздывающего объекта (предиктора). Идею этого подхода много лет назад закрепил за собой Г-н Смит. Ее практическая реализация во времена аналоговой техники натолкнулась на серьезные трудности. Поэтому продуктивная идея не нашла тогда своего воплощения.

Положение изменила цифровая техника. Она открыла принципиально новые возможности для реализации идеи Смита. Специалисты по системам автоуправления уже оценили это и получили в этом направлении ряд результатов. Эффективность каждого результата и его пригодность для широкого использования зависят от деталей подхода к решению задачи. Имеют значение даже отдельные нюансы. И существует опасная вероятность, что из-за каких-то малозначимых на первый взгляд причин идея предиктора окажется недооцененной и не получит должного распространения.

Если материалы этой статьи помогут избежать подобного исхода дела, если помогут сделать предиктор Смита эффективным и простым в применении средством, то автор будет считать поставленную перед собой цель достигнутой.

Назначение предиктора Смита

Предиктор — это дополнительная программная опция, устанавливаемая в микропроцессорные регуляторы, работающие в замкнутых системах управления. Например, в универсальные ПИД-регуляторы или USWO-регуляторы.

Предиктор предназначен для повышения качества работы замкнутых систем автоматического управления в случаях, когда управляемый объект обладает транспортным запаздыванием, а также, когда объекты имеют высокий порядок.

Последнее является важным моментом. Дело в том, что доля объектов управления с классическим транспортным запаздыванием относительно невелика. А вот с объектами повышенного порядка приходится иметь дело гораздо чаще. Их характерным признаком является слабая начальная реакция на управляющее воздействие регулятора. Ее продолжительность соизмерима с общим временем отклика объекта на воздействие, а уровень находится в пределах погрешности измерения датчика или не различим на фоне помех в линиях передачи сигнала. Такая особенность начинает проявляться уже на объектах четвертого порядка. При более высоких порядках она усиливается. В совокупности это весьма

Очевидно, что высочайший тип эффективности есть тот, который обеспечивает применение имеющихся материалов с наибольшей пользой.

Джавахарлал Неру

широкий круг объектов. Предиктор Смита предоставляет возможность повысить качество управления всеми этими объектами.

Несомненным достоинством предиктора является его способность одновременно бороться как с объективными, так и субъективными негативными последствиями запаздывания. Предоставляя прогноз, он позволяет регулятору формировать более эффективные управляющие команды. И тем самым сокращает объективные потери качества управления. Снижение субъективных потерь объясняется тем, что настройка регулятора с предиктором выполняется по методикам, разработанным применительно к незапаздывающим объектам. А это более простые и отработанные длительной практикой методики.

Как работает предиктор

Когда регулятор имеет дело с запаздывающим объектом, искажается естественная логика работы замкнутого контура управления. В самом деле, регулятор вырабатывает команды управления, соответствующие текущему состоянию объекта, а реагировать на эти команды объект начнет только спустя время запаздывания t_z . К тому моменту состояние объекта будет уже другим. Соответственно другими должны быть и команды регулятора. Для восстановления нормальной логики управления воздействия, формируемые регулятором в данный момент, должны соответствовать тому состоянию объекта, в котором он окажется через время t_z . Для этого регулятору нужно знать это будущее состояние объекта. Значит, ему необходим прогноз на период длительностью t_z .

Осуществим ли в принципе такой прогноз в цифровом регуляторе, способном выполнять расчеты на основе математических моделей?

Для ответа на этот вопрос нужно назвать факторы, которые определяют будущее состояние объекта управления, удаленное на время t_z . Таких факторов можно указать три:

1. текущее состояние объекта;
2. управляющие команды, поданные регулятором на запаздывающий объект за время t_z ;
3. возмущения, которые тем или иным образом окажут воздействие на объект управления.

Прогнозировать последствия перечисленных факторов регулятор сможет только при условии, что ему будет предоставлена о них информация. В этом смысле последний из названных факторов оказывается проблемным. Принцип управления «по отклонению» наделяет замкнутые системы ценной способностью противодействовать негативным последствиям любых

возмущающих воздействий на объект независимо от их происхождения. Поэтому потребность в измерении возмущений просто отсутствует и в преобладающем большинстве замкнутых систем информация о возмущениях регулятору не предоставляется. Следовательно, прогноз их влияния на ОУ объективно недоступен регулятору¹. Ему остается по-прежнему противодействовать всем без исключения возмущениям, обнаруживая их последствия в виде изменившегося рассогласования (*отклонения управляемой переменной от задания*).

С двумя другими вышеназванными факторами дело обстоит по-другому. Информация о них регулятору доступна.

Что касается текущего состояния объекта управления, то каждый регулятор в замкнутом контуре управления в обязательном порядке получает сигнал от датчика регулируемой переменной. Современный микропроцессорный регулятор обладает памятью, в которой может хранить некоторую предысторию измеряемого сигнала. И на основе этой предыстории можно делать приближенную численную оценку необходимых компонентов вектора состояния объекта (скорости, ускорения и т. д.).

Еще проще обстоит дело с информацией об управляющих командах, поданных на объект за последний отрезок времени t_z . Эти команды формировались самим регулятором. Соответственно, они ему известны и также могут сохраняться в памяти.

Общий вывод таков: прогноз состояния ОУ на период t_z с учетом всех влияющих факторов объективно невозможен. Тем не менее, неизбежные последствия двух значимых факторов на будущее состояние объекта вполне поддается оценке. Информация об этих последствиях является той возможной помощью, которую можно оказать регулятору, управляющему запаздывающим объектом. Вполне достойная работа для приличного предиктора.

Итак, *непосредственной обязанностью предиктора является расчет будущего состояния управляемого объекта, отдаленного на время запаздывания t_z , в зависимости от текущего состояния объекта и от управляющих команд, поданных регулятором за последний период, равный t_z .*

Микропроцессорный регулятор хорошо приспособлен для расчета прогноза на основе математических моделей. Например, в виде дифференциального уравнения, связывающего регулируемую переменную с управляющими воздействиями регулятора. В качестве начального условия к дифференциальному уравнению должно служить текущее состояние ОУ. Тем самым при формировании прогноза естественным образом учитывается первый фактор. Остается подставить в правую часть дифференциального уравнения управляющие команды, поданные регулятором на объект за последний период времени t_z (учесть второй фактор). И тогда решение уравнения будет представлять собой искомый прогноз, который требуется от предиктора.

¹ Системы управления с измерением отдельных возмущений применяются достаточно широко и успешно. Это в своем роде также управление с предсказанием. Но ситуация иная, не связанная с запаздыванием.

Режим работы регулятора с предиктором

При использовании предиктора Смита несколько увеличивается набор действий, выполняемых регулятором в каждом временном цикле. Обновляя управление, регулятор в обязательном порядке:

1. считывает показания датчика и заносит результат в память;
2. готовит исходные данные для работы предиктора (определяет начальные условия для прогнозирующей математической модели);
3. рассчитывает значение регулируемой переменной через период t_z (делает прогноз);
4. по спрогнозированному значению определяет рассогласование;
5. в соответствии с используемым алгоритмом управления (например ПИД-алгоритмом) вычисляет управляющее воздействие;
6. выдает управляющее воздействие на исполнительные устройства системы;
7. запоминает выданное управление для последующего прогноза.

Регулятор, не использующий предиктор, сразу после действия 1 определяет рассогласование, и далее выполняются только пункты 5 и 6.

О точности прогноза и о выборе прогнозирующей математической модели

Положительный эффект от использования предиктора возможен только при достаточной достоверности рассчитываемого прогноза. Вполне очевидно, что ошибочный прогноз повлечет ошибочные действия регулятора. Дезинформирующий предиктор способен вообще лишить систему управления работоспособности.

Достоверность прогноза в первую очередь обеспечивается адекватностью расчетной математической модели предиктора реальному объекту управления. А точнее сказать, его незапаздывающей части.

Добиваться необходимой степени адекватности математической модели можно путем усложнения ее структуры и повышения порядка. Но движение в этом направлении наталкивается на ограничения. Дело в том, что достоверность прогноза зависит не только от истинности расчетных формул. Она также определяется точностью исходных данных, в роли которых выступают начальные условия к дифференциальному уравнению (математической модели). Известно, что начальные условия к дифференциальному уравнению N -го порядка включают в себя значение самой управляемой переменной, а также значения всех ее производных от первого до $(N-1)$ -го порядка. Как уже говорилось, для определения этих значений регулятор использует сохраняемую в памяти предысторию дискретных измерений, полученных от датчика управляемой переменной. Это дает регулятору возможность делать численную оценку искомых производных каким-либо из известных методов. Но, во-первых, все методы численной оценки

являются приближенными и содержат методическую погрешность, которая заметно нарастает с увеличением порядка оцениваемой производной. А во-вторых, точность численных оценок производных (особенно высоких порядков) очень чувствительна к шумовым погрешностям в измерениях регулируемой переменной. Таким образом, повышение порядка математической модели с одной стороны, повышает достоверность используемых в предикторе расчетных формул, а с другой — приводит к потере точности в оценке начальных условий к модели. С определенного момента последнее начинает преобладать и неизбежно снижает достоверность прогноза. Разработчикам опции предиктора Смита это говорит о существовании прогнозирующих моделей оптимального порядка. И о том, что этот порядок обязательно будет ограниченным.

Если предиктор разрабатывается для универсального регулятора, предназначенного для управления объектами разного типа (типичный представитель ПИД-регулятор), то крайне желательно, чтобы и предиктор также обладал свойством универсальности. Под этим понимается способность предиктора обеспечивать достаточную точность прогноза для всего класса возможных объектов управления. Иначе говоря, для любого управляемого объекта в предикторе должна найтись адекватная прогнозирующая модель. На первый взгляд осуществить такое едва ли возможно. Однако есть обстоятельство, упрощающее задачу. Дело в том, что в каждом приложении срок прогноза всегда ограничен. Значит и адекватность модели необходима также на ограниченном интервале времени. Разумеется, величина интервала адекватности должна быть не меньше срока прогноза (времени запаздывания).

Универсальный предиктор может располагать набором прогнозирующих моделей различного типа. Тогда выбор наиболее подходящей модели для конкретного объекта будет предоставлен наладчику системы управления. Параметры выбранной модели определяются в процессе ее идентификации. Цель идентификации уже понятна — сделать начальную реакцию прогнозирующей модели на воздействия регулятора максимально похожей на реакцию незапаздывающей части управляемого объекта.

Чем сложнее прогнозирующая модель, и чем больше у нее параметров, тем затруднительней становится процедура идентификации, выполняемая в ходе настройки предиктора. Только легко настраиваемая опция предиктора может стать популярной у широкого круга пользователей универсальных регуляторов. Поэтому для предиктора годятся простые прогнозирующие модели, имеющие малое число легко идентифицируемых параметров. Подбор таких моделей является ключевым моментом при разработке опции предиктора для универсальных регуляторов.

Не исключается возможность построения предиктора на основе одной прогнозирую-

щей модели. Такой вариант освободил бы пользователей от необходимости выбора модели, что упростило бы ситуацию. Но сможет ли единая модель обеспечить работоспособность предиктора на запаздывающих объектах управления различного типа? Хороший вопрос для пытливых.

В общем случае прогнозирующая модель в универсальном регуляторе способна только приближенно описывать реакцию реального объекта. Поэтому срок достоверного прогноза на ее основе будет обязательно ограниченным. Но если этот срок превосходит время запаздывания у объекта управления, то появляется основание рассчитывать на положительный эффект от использования предиктора.

Вариант реализации универсального предиктора Смита

Реализация предиктора Смита возможна в разных вариантах. Предпочтительным должен считаться тот вариант, который в равных условиях сможет обеспечить лучшее качество управления запаздывающим объектом. При сравнении вариантов также нужно оценивать трудоемкость процедуры настройки предиктора и однозначность ее исполнения. Как уже отмечалось, для практики этот фактор имеет большое значение.

Один из возможных вариантов предиктора Смита для универсальных регуляторов разработан специалистами научно-производственного подразделения «ПОПА-USWO» (www.uswo.lgg.ru). В нем используется прогнозирующая математическая модель в виде неполного дифференциального уравнения 2-го порядка:

$$T_m \frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{dX}{dt} = K_m \cdot Y, \quad (1)$$

где $X(t)$ — управляемая переменная (прогнозируемая величина), $Y(t)$ — управляющие воздействия регулятора, хранимые в его памяти, T_m и K_m — идентифицируемые параметры.

Почему именно модель (1)? Во-первых, для нее сравнительно легко определяются начальные условия. Они включают в себя текущее значение самой управляемой переменной $X(t)$, получаемое от датчика (в процентах

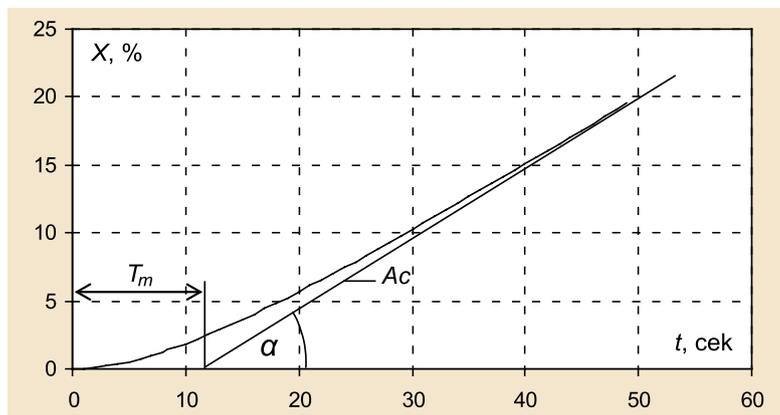


Рис. 1. Переходная характеристика (кривая разгона) математической модели (1)

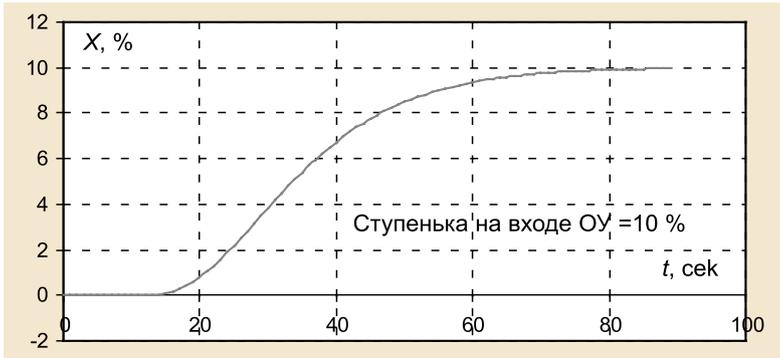


Рис. 2. Экспериментальная кривая разгона запаздывающего объекта управления

от диапазона измерения) и величину ее первой производной dX/dt (оценивается конечно-разностным способом по предыстории сигнала). Во-вторых, модель содержит всего два параметра T_m и K_m , подлежащие идентификации при настройке предиктора. Особенность этих параметров в том, что они наглядно отображаются на переходной характеристике (кривой разгона) математической модели (1). На рисунке 1 показано, что асимптота (Ac), проведенная к кривой разгона, отсекает по оси времени отрезок, равный значению параметра T_m . А тангенс угла наклона асимптоты к оси времени численно равен произведению $K_m \times \Delta Y$. Где ΔY — величина ступенчатого сигнала, по-

данного на вход при получении кривой разгона. Эта особенность дифференциального уравнения (1) позволяет легко делать приближенную оценку параметров T_m и K_m для прогнозирующей модели (1), если наладчик располагает экспериментальной кривой разгона объекта управления.

Пример практического применения предиктора Смита

Пример преследует две основных цели. Первая, показать штатные действия наладчика ПИД-регулятора в замкнутой САР в случае применения опции предиктора Смита. Вторая, продемонстрировать эффект, получаемый от использования предиктора.

Наладчик, решивший применить предиктор, должен выполнить его предварительную настройку. Она сводится к определению параметров прогнозирующей модели T_m и K_m , при которых модель наиболее точно описывает начальную реакцию управляемого объекта на воздействия регулятора. И конечно, нужно указать запаздывание t_z — период, на который предстоит делать прогноз.

Благоприятно то, что настройка предиктора может выполняться на основе тех же сведений об управляемом объекте, которые используются при определении параметров настройки регулятора. На практике наиболее доступным и надежным видом сведений о свойствах объекта является кривая разгона. Пусть в рассматриваемом примере именно такой вариант сведений имеется в распоряжении наладчика. Экспериментально снятая кривая разгона объекта, которым предстоит управлять ПИД-регулятору, представлена на рис. 2.

По форме кривой разгона сразу видно, что объект управления обладает самовыравниванием (не астатический) и имеет задержанную реакцию на воздействия регулятора. Этот объект относится к классу ПИД-управляемых, т. е. корректно настроенный ПИД-регулятор способен обеспечить устойчивую работу замкнутой системы. Но для практики устойчивости системы недостаточно. Интерес представляет качество ее работы и возможность его повышения. Поскольку начальный участок кривой разгона рассматриваемого объекта можно расценивать как запаздывание, то имеет смысл воспользоваться предиктором Смита.

Прежде чем заняться предиктором, было принято решение выяснить качество работы системы управления с традиционным ПИД-регулятором без опции предиктора. Для этого разным специалистам было предложено независимо друг от друга произвести оптимальную настройку ПИД-регулятора на основе кривой разгона объекта, изобра-

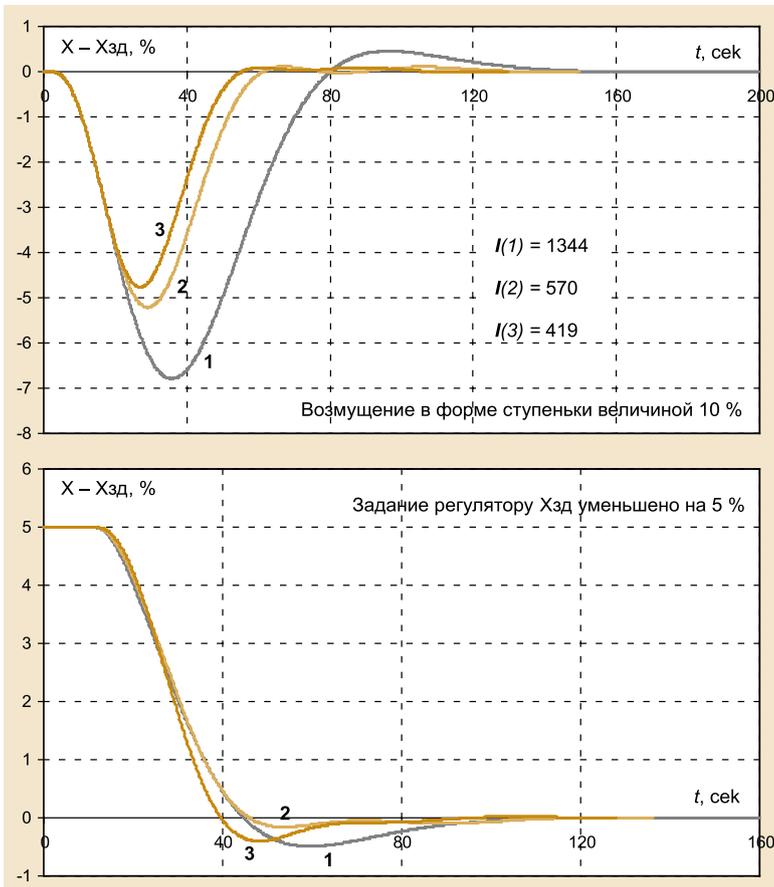


Рис. 3. Переходные процессы в замкнутой САР с запаздывающим объектом: 1 — без предиктора, 2 и 3 — с предиктором; $I(*)$ — интегральные квадратичные оценки

женной на рисунке 2. Полученные ими результаты имели некоторый разброс, объясняемый, в частности, разными представлениями о предпочтительном характере переходных процессов в замкнутой системе. После обсуждения остановились на выборе следующего варианта параметров настройки:

$$K_p = 0,8; T_i = 20 \text{ с}; T_d = 7; \quad (2)$$

Оценить качество работы системы с ПИД-регулятором (2) можно по виду наблюдаемых в ней переходных процессов. Они представлены на рисунке 3 траекториями с номером 1. Процессы характеризуют работу САР в двух режимах:

- **стабилизации** (отработка действующего на объект возмущения);
- **слежения** (за изменением задания регулятору).

Необходимость оценки работы замкнутой системы в обоих названных режимах объясняется особенностью ПИД-алгоритма управления. Она состоит в том, что оптимальные ПИД-настройки в режиме стабилизации и слежения отличаются друг от друга. Настройки (2) выбраны как компромиссные, пригодные для обоих режимов.

По характеру траекторий 1 видно, что эксперты отдают предпочтение процессам с минимальной колебательностью. В режиме стабилизации ПИД-регулятор допускает одно значимое отклонение управляемой переменной $X(t)$ от задания и затем активно возвращает ее на прежний уровень с незначительным перерегулированием (менее 7% от предыдущего максимума). В режиме слежения проблемный для ПИД-регуляторов первый «выбег» при тех же настройках (2) не превышает 10% от величины изменения задания. Это очень неплохой показатель на запаздывающем объекте. Приведенные на рис. 3 процессы «1» послужат отправной точкой и позволят в дальнейшем оценить эффект от применения предиктора.

Возвращаемся к предиктору. Наладчик принимает решение применить его, рассчитывая повысить качество работы рассматриваемой системы управления. Прежде всего, ему нужно провести идентификацию прогнозирующей модели (1), используемой в предикторе. Это

значит, он должен определить значения параметров T_m и K_m , при которых модель наиболее точно описывает начальную реакцию незапаздывающей части объекта управления.

В качестве исходных данных используется кривая разгона (рис. 1)

Наладчику доступны *два варианта действий*. Имеет смысл рассмотреть оба и сравнить их по качеству результата и по трудоемкости реализации.

Первый вариант использует особенности графического представления параметров математической модели (1) на кривой разгона. Наладчик по своему усмотрению откладывает на графике кривой разгона объекта величину времени запаздывания. Например, на рис. 2 видно, что на начальном отрезке времени $[0; 13 \text{ с}]$ объект практически не реагирует на входное воздействие. Размер этого отрезка можно принять за время запаздывания:

$$t_z = 13 \text{ с}. \quad (3)$$

Теперь нужно указать на кривой разгона точку перегиба «а» и провести через нее касательную. Возможный результат выполнения такого действия показан на рис. 4.

Согласно свойствам уравнения (1), значение параметра T_m можно характеризовать длиной отрезка $[t_z; b]$. В данном случае этот отрезок составляет примерно 5,7 с, то есть:

$$T_m \approx 5,7 \text{ с}. \quad (4)$$

Тангенс угла наклона касательной определяется как отношение противолежащего катета к прилежащему. Катеты измеряются на графике, и рассчитывается тангенс:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{[a;c]}{[b;c]} \approx 0,34. \quad (5)$$

Величина ступенчатого воздействия на вход объекта при записи кривой разгона известна $\Delta Y = 10\%$. Искомый параметр K_m рассчитывается по формуле:

$$K_m = \operatorname{tg} \alpha / \Delta Y = 0,034. \quad (6)$$

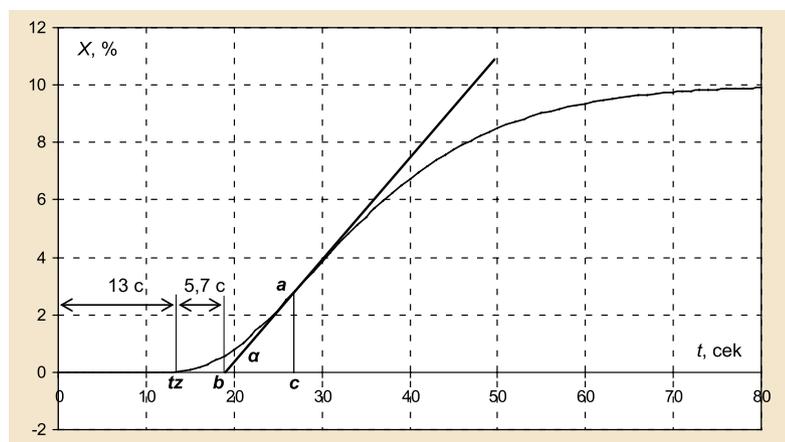


Рис. 4. Графический способ определения параметров настройки предиктора по кривой разгона объекта управления

Необходимые данные для опции предиктора получены. Значения (3), (4) и (6) остается ввести в регулятор.

Для испытания системы осталось определить параметры настройки ПИД-регулятора. Это должны быть оптимальные настройки для управления рассматриваемым объектом, но *без учета запаздывания*. Лучше всего воспользоваться методом масштабирования (ММ) [1]. Он отличается простотой, а главное, надежностью получаемого результата. В качестве исходных данных для ММ подойдет кривая разгона объекта управления (см. рис. 2) с отброшенным временем запаздывания (3). Программа «ММ-настройка» [2], разработанная специально

для пользователей метода масштабирования, быстро выдает искомый результат:

$$K_p = 1, T_i = 13 \text{ с}, T_d = 4 \text{ с}. \quad (7)$$

Параметры (7) были введены в регулятор. Переходные процессы, возникающие в замкнутой системе в режимах стабилизации и слежения, представлены траекториями 2 на рисунке 3. В целом характер процессов остался прежним, колебательность минимальна. Положительный эффект от применения предиктора проявляется вполне определенно. Если делать сравнение с процессами 1, то видно, что, максимальная динамическая ошибка управления в режиме стабилизации снизилась с 6,75% до 5,2%. Относительное уменьшение ошибки составило около 23%. Одновременно примерно вдвое сократилась продолжительность переходных процессов. Еще заметнее эффект предиктора проявился в интегральной квадратичной оценке. Она опустилась до значения $I(2) = 570$, вместо прежнего $I(1) = 1344$ (без предиктора).

В режиме слежения также заметно преимущество регулятора с предиктором. Управляемая переменная быстрее переходит на новый уровень задания. При этом допускает меньший по величине первый «выбег».

Специалисты должны согласиться, что первый вариант определения данных для предиктора не создает наладчику ощутимых затруднений. Все, что ему требуется, это экспериментальная кривая разгона объекта управления. В этом достоинство первого варианта. Стоит подчеркнуть, что его существование обусловлено спецификой прогнозирующей модели (1). Вместе с тем у варианта имеются и недостатки. В первую очередь, это возможность неоднозначного выполнения некоторых действий. Например, можно по-разному указать время запаздывания на кривой разгона. Еще больше могут оказаться расхождения в выборе точки перегиба «а» и особенно в способе проведения касательной через

эту точку. Это, несомненно, повлияет на получаемые значения параметров T_m , K_m и t_z для предиктора и, соответственно, на эффективность его работы.

Недостаток неоднозначности практически устраняется во втором варианте определения параметров T_m , K_m и t_z для предиктора. Он повышает точность результата и одновременно позволяет контролировать качество идентификации прогнозирующей модели. Вторым вариантом стал возможен благодаря специально созданному инструменту — прикладной компьютерной программе визуальной аппроксимации «VAPW» (разработка НПП «ПОРА-USWO»). Стандартными командами «копировать/вставить» в программу загружаются в табличном виде данные с записью кривой разгона управляемого объекта. Указывается величина ступенчатого воздействия, которое подавалось на вход объекта при снятии кривой разгона. Это позволяет программе отобразить график кривой на дисплее. Далее наладчику предлагается список возможных прогнозирующих моделей, в котором он выделяет модель, соответствующую той, что используется в предикторе настраиваемого регулятора. В рассматриваемом случае выбирается модель вида (1). Кривую разгона выбранной модели с заданными по умолчанию параметрами T_m , K_m и t_z программа также выводит на монитор. На экране две кривые разгона видны одновременно. Наладчик получает возможность нажатием определенных клавиш изменять с малым шагом значения параметров T_m , K_m и t_z в сторону увеличения или уменьшения. В соответствии с новыми значениями кривая разгона прогнозирующей модели изменяет свою форму и плавно перемещается по экрану. Задача наладчика заключается в том, чтобы добиться наилучшего совпадения кривых разгона реального объекта и прогнозирующей модели на начальном интервале времени. Точность совпадения контролируется визуально. Это позволяет наладчику иметь наглядное представление о степени адекватности прогнозирующей модели реальному объекту управления, а также оценить срок достоверного прогноза. Как показывает опыт, даже при начальных навыках работы с программой «VAPW», на достижение наилучшего совпадения кривых разгона затрачивается не более двух минут. Совмещение кривых, достигнутое в рассматриваемом примере, демонстрируется на рис. 5.

Хорошо видно, что на начальном отрезке времени $[0; 28]$ секунд кривые разгона практически совпадают. Причем участок хорошего совпадения кривых T_c , следующий за временем запаздывания t_z , превосходит по продолжительности величину самого запаздывания. Значит есть основание рассчитывать на достаточную достоверность прогноза, который предстоит выполнять предиктору.

Численные значения параметров T_m , K_m и t_z программа отображает в строке под графиком. В рассматриваемом примере наилучшее совпадение кривых разгона достигается при следующих значениях:

$$t_z = 13,8 \text{ с}; T_m = 14 \text{ с}; K_m = 0,06; \quad (8)$$

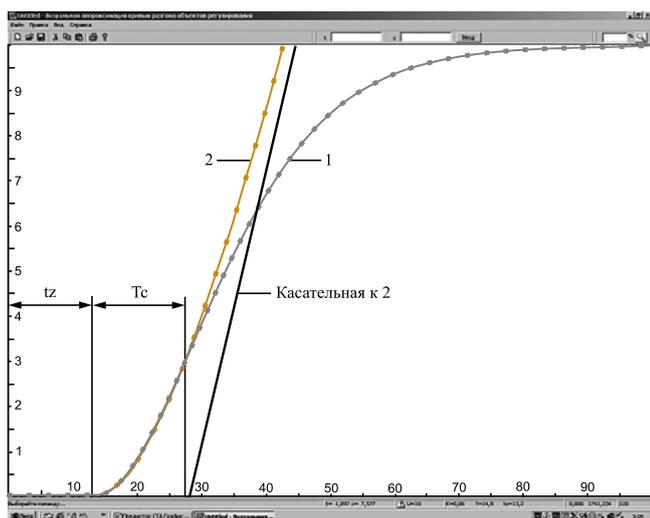


Рис. 5. Экран программы визуальной аппроксимации «VAPW» с совмещенными кривыми разгона объекта управления (1) и прогнозирующей модели (2)

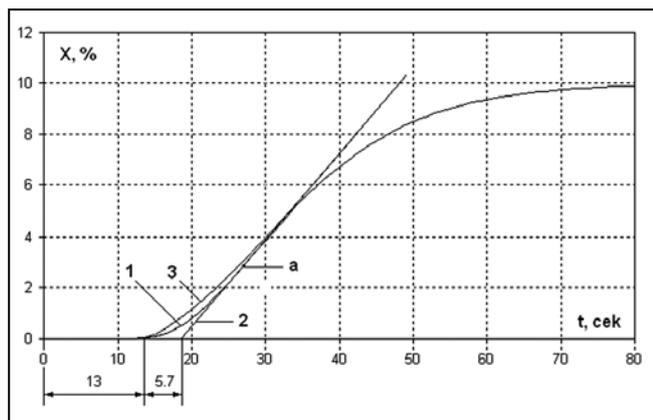


Рис. 6. Оценка точности прогнозирующей модели с параметрами (3), (4), (6): (1 – кривая разгона ОУ; а – точка перегиба кривой 1; 2 – касательная в точке «а»; 3 – кривая разгона прогнозирующей модели)

Данные первого варианта несколько отличаются от результата (8). Чтобы оценить их достоверность, можно выставить значения параметров (3), (4) и (6) в программе «VAPW» и посмотреть совпадение кривых разгона. Получается картина, представленная на рис. 6. Она ясно показывает, что качество идентификации прогнозирующей модели в первом варианте заметно ниже.

Это объясняется тем, что первый вариант определения параметров T_m , K_m и t_z лишен визуального контроля, предоставляемого программой «VAPW». Тем не менее, процессы 2 на рис. 3 продемонстрировали, что предиктор и при сравнительно грубых настройках по первому варианту вполне работоспособен и определенно повышает качество работы системы управления.

Программа «VAPW» не только облегчает работу наладчика при настройке предиктора. Важнее, что она дает ему уверенность в правильном выборе параметров прогнозирующей модели, а также основание рассчитывать на максимальную отдачу от использования опции предиктора.

Уместно ожидать, что прогнозирующая модель с параметрами (8) позволит делать более точный прогноз и усилит положительный эффект от предиктора. Чтобы оценить его, нужно ввести в регулятор параметры (8) и проанализировать качество работы замкнутой системы в режиме стабилизации и слежения.

Поскольку несколько изменилась оценка времени запаздывания у объекта управления, желательно еще раз обратиться к методу масштабирования, чтобы уточнить параметры настройки ПИД-алгоритма. При наличии

программы «ММ-настройка» это не отнимает много времени. Результат получается таким:

$$K_p = 1,2; T_i = 12 \text{ с}; T_d = 1,5 \text{ с}; \quad (9)$$

После ввода в ПИД-регулятор параметров (9) замкнутая система была запущена в действие. Полученные переходные процессы для режима стабилизации и слежения представлены на рисунке 3 траекториями, обозначенными цифрой «3». Как и ожидалось, положительный эффект от использования предиктора действительно несколько усилился. Но стоит согласиться, что и процессы 2 также весьма неплохи. Это говорит о том, что предиктор, построенный на основе прогнозирующей модели (1), не предъявляет повышенных требований к точности определения его параметров. Факт для практики весьма полезный.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что предиктор Смита является действенным средством повышения качества управления запаздывающими объектами, а также объектами высоких порядков. Подобного рода объекты имеют широкое распространение. Поэтому включение функции предиктора в состав базовых функций универсальных цифровых регуляторов является, несомненно, оправданным.

Способ реализации предиктора является ключевым моментом. От него в преобладающей степени зависит, насколько широко и успешно предиктор будет применяться на практике. Недостаточно удачный способ может превратить предиктор в эксклюзив, применяемый в редких, особых ситуациях. В худшем случае вообще погубит перспективную идею.

Предиктор, создаваемый в расчете на массовое применение, обязан не только полноценно исполнять свои функциональные обязанности, он также должен быть простым и удобным в настройке. Разработчикам такого предиктора можно рекомендовать опыт, накопленный в НПП «ПОРА-USWO».

Список литературы

1. Бажанов В.Л. Метод масштабирования – эффективный инструмент для практической настройки регуляторов в замкнутых САР // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 6.
2. Бажанов В.Л. Программа «ММ-настройка» для определения параметров ПИД-регуляторов по методу масштабирования // Автоматизация в промышленности. 2007. № 6.

Бажанов Владимир Леонидович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения.
Контактный телефон (927) 760-28-84.
E-mail: tklinkov@mail.ru

Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:

через каталоги "Роспечать" 81874 и "Пресса России" 39206 • сайт журнала <http://www.avtprom.ru> • Редакцию

Адрес редакции: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, офис 360 Тел.: (495) 334-91-30, (926)212-60-97 E-mail: info@avtprom.ru