

Основные ошибки при оптимизации регуляторов для замкнутых систем управления

В.А. Жмудь, Л.В. Димитров

НГТУ, Новосибирск, Россия, Технический университет Софии, София, Болгария

Аннотация: Проектирование регуляторов для замкнутых динамических систем управления (или регулирования) обсуждается во многих статьях. Поток публикаций не иссякает, хотя, по мнению автора, для решения большинства задач, которые иллюстрируют в этих статьях проблематику и результаты, уже разработан достаточный арсенал методов и методик. Важно разграничить задачи на различные множества, отделив задачи, решение которых еще не достигнуто от задач, решение которых уже давно имеется. Также целесообразно выделить класс задач, решение которых не требуется вследствие некорректности их формулировки. Столь же важно разграничить методы, которые себя окончательно изжили и методы, которые содержат в себе существенный потенциал. Модификация устаревших методов, не приводящая к существенному повышению их потенциала при условии существования более эффективных методов для решения тех же задач, по-видимому, не целесообразна. Разумеется, невозможно и нецелесообразно вводить запреты на публикацию неактуальных статей или статей, в которых авторы используют ложные рассуждения, сознательно или неосознанно игнорируют наличие более эффективных методов решения задач, чем те, о которых они рассуждают. Но потребность классификации, позволяющей отличить актуальные задачи от неактуальных примеров и эффективные методы от неэффективных, по-видимому, остро назрела. В данной статье делается попытка такой классификации, даются основания для нее.

Ключевые слова: Автоматика, оптимизация, моделирование, управление, регуляторы, контроллеры, ПИД

ВВЕДЕНИЕ

Некоторые статьи по проектированию регуляторов демонстрируют слабую осведомленность их авторов обо всем арсенале методов их проектирования. Имеется ряд формальных признаков этой недостаточной осведомленности. Основным таким признаком является недостаточная ясность изложения, отсутствие логической связи между отдельными разделами публикации, необоснованное сужение

задачи. Также встречается исключительно специфические примеры, неполнота анализа результата и так далее. В некоторых случаях авторы допускают ошибочные утверждения, или утверждения, справедливые лишь в некоторых частных случаях, выдвигают как справедливые при всех условиях. Встречается также утверждения, например, о безусловном преимуществе какого-либо метода, критерия для оптимизации или какой-то структуры, утверждения бездоказательные или на основе ссылки на какую-либо публикацию.

В данной статье на примере некоторых характерных ошибок анализируется указанная тенденция. Это дает перечень характерных ошибок с иллюстрацией или обоснованием их ошибочности.

1. О ТАБЛИЧНЫХ МЕТОДАХ «ОПТИМИЗАЦИИ»

К табличным методам оптимизации относятся, прежде всего, методы *Циглера-Никольсона* (*Зиглера-Никольсона* у других авторов [2]) и метод *Коэна-Куна* [1]. Широко опубликованные в свое время, эти методы вошли во многие учебники, поэтому они столь популярны в публикациях. И это естественно: чему специалиста учили в студенческие годы, то он и будет применять в своей профессиональной деятельности, тому же самому он и будет обучать студентов. Но наука развивается, численные методы совершенствуются, специалисты обязаны интересоваться новыми методами, в особенности – преподаватели и ученые.

Как сказано в [1], метод *Циглера-Никольсона* был первым официально опубликованным методом расчета ПИД-регуляторов, который был опубликован в 1942 году.

Не вдаваясь в детали каждого из табличных методов, рассмотрим их в совокупности.

1. Каждый из таких методов основан на предположении, что модель объекта является последовательно соединенными апериодическим звеном (то есть фильтром низких частот первого порядка) и звеном чистого запаздывания. В некоторых случаях предполагается, что порядок фильтра НЧ второй, при этом имеется в виду, что фильтр второго порядка образован последовательным включением одинаковых фильтров первого порядка.

2. Для начала анализируется отклик реального объекта на ступенчатое воздействие, либо отклик объекта в составе системы с пропорциональным регулятором. Во втором случае путем проб отыскивается такое значение коэффициента пропорционального регулятора, при котором в системе будут незатухающие автоматические колебания. В других случаях подбирается коэффициент, при котором перерегулирование имеет заданное значение или колебания затухают с некоторым наперед заданным коэффициентом затухания.

3. По полученному процессу предлагается снять его характерные параметры, а также следует зафиксировать коэффициент, при котором имеет место такой процесс.

4. На основании полученных характеристик по эмпирически найденным соотношениям предлагается рассчитать все три коэффициента ПИД-регулятора.

Современные методы исследований замкнутых систем, основанные на программно-аппаратных средствах моделирования, показывают, что даже для объекта, который, действительно, описывается такой моделью, которая принята за основу, полученный ПИД-регулятор далеко не идеален.

Но данная гипотеза ошибочна в большинстве практических задач, если не во всех. Поэтому если нет достаточных оснований для отождествления модели объекта с той, которая предполагается в подобном методе, то этот метод использовать не следует. Действительно, метод *Циглера-Никольсона* использовали лишь вследствие отсутствия других методов. Но сейчас не 1942 год, количество методов проектирования регуляторов исчисляется сотнями [1].

Попытка использовать метод расчета регуляторов для объектов с различными математическими моделями, на основании для результатов с единственной выбранной моделью, может оказаться успешной лишь случайно. Поэтому табличные методы бесперспективны за редким исключением. Именно поэтому те, кто ими еще пользуется, все же используют так называемую «доводку», то есть окончательную настройку коэффициентов регулятора на основе эмпирических или просто интуитивных изменений отдельных коэффициентов.

Кроме того, даже если предположить, что модель объекта полностью идентична тому предположению, которое использовано в конкретном табличном методе, в различных задачах к системе предъявляются различные требования. В некоторых случаях перерегулирование 30 % допустимо, в других случаях даже 5 % недопустимо. Поэтому в двух разных задачах, даже если модели объектов совпадают, то в одном случае регулятор может соответствовать предъявляемым к системе требованиям, а в другом случае такой регулятор им не соответствует. Поэтому метод, который позволяет вычислить коэффициенты регулятора

только на основании свойств объекта, заведомо не хорош. Метод должен также учитывать требования, предъявляемые к системе.

Вывод 1. Табличные методы устарели, так как обладают большим количеством недостатков.

2. О ПРИМЕНЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Регулятор реагирует на входные сигналы, из которых по заданному алгоритму формирует свои выходные сигналы для управления объектом. Регулятор не может формировать сигнал, пропорциональный фактической производной его входного сигнала (сигнала ошибки), а может лишь вычислять оценку этой производной по определенному алгоритму, который может реализовываться в реальном времени. Так же обстоят дела и с интегралом: регулятор вычисляет интеграл от входного сигнала ошибки путем интегрирования этого сигнала по какому-то из известных алгоритмов.

Регуляторы бывают аналоговые и цифровые.

Аналоговые регуляторы интегрируют лишь приблизительно за счет заряжающейся емкости, которая, как правило, стоит в обратной связи операционного усилителя. Дифференцирование в них осуществляется за счет использования дифференцирующей цепи. Обе эти операции реализуются не идеально. Поскольку высокоточные конденсаторы крайне редки, дороги, и диапазон значений их емкости невелик, то погрешность реализуемой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в области высоких частот, как правило, не менее 0,01 %, чаще даже более 0,1 %, в области низких частот эта погрешность не менее 2 %, а как правило даже больше 10 %. Поэтому при проектировании аналоговых регуляторов следует учитывать эти возможности их реализации. То есть система должна сохранять все свои положительные свойства при изменении АЧХ в этих пределах.

Цифровые регуляторы вычисляют производную и интеграл от входного сигнала по одному из возможных алгоритмов. К таким алгоритмам относятся простой метод *Эйлера*, трапециидальный метод, метод *Рунге-Кутты* (2-го порядка, 4-го порядка, 5-го порядка и так далее), метод *Эйлера* с упреждением, адаптивный метод *Булири-Стоера* и так далее.

В программно-аппаратных средствах, которые используют точное значение производной и интеграла в законе управления, заложена принципиальная ошибка. Отличия между идеальной (точной) производной входного сигнала и ее оценкой, определяемой в режиме реального времени, настолько существенны, что результат моделирования может отличаться кардинально. Это дает преимущество применению тех средств моделирования, которые вычисляют оценки производной и интеграла только из тех отсчетов сигнала, которые доступны для измерения, то есть из отсчетов сигнала по мере их поступления. Программа

MATLAB (приложение *Simulink*) реализует принципиально иной метод вычисления сигналов, поэтому у нее имеются преимущества перед фактическими регуляторами, и в этом ее принципиальный недостаток. Программа *VisSim* вычисляет производную и интеграл в точности теми же методами, которыми может вычислять их реальный цифровой регулятор. Поэтому эта программа не имеет преимуществ перед реальным регулятором. Тем самым эта программа обладает достоинством перед другими программами. Это преимущество состоит в том, что результат, который вычислен при моделировании, может быть всегда реализован в виде конкретного регулятора. А если результат не может быть реализован, он никогда не будет вычислен в программе *VisSim*.

Например, программа *VisSim* не может вычислить сигнал производной на первом такте своей работы. Эта программа не может вычислить сигнал второй производной на первом и втором такте работы. Все методы интегрирования и дифференцирования, реализуемые в этой программе, по этим же алгоритмам могут и должны быть реализованы в регуляторе. Действительно, имеется множество примеров того, что изменение метода интегрирования в системе изменяет ее свойства, вплоть до того, что система может стать неустойчивой.

Другой пример состоит в том, что в программе *MATLAB* можно проанализировать устойчивость и смоделировать работу контура, в котором АЧХ не затухает вплоть до бесконечных частот. В терминах теории регулирования это означает, что степень числителя передаточной функции больше или равна степени ее знаменателя. Программа *VisSim* не сможет моделировать такой контур. В этом состоит ее достоинство. Действительно, таких контуров в природе (то есть в реальных технических устройствах) быть не может. Если исследователь поставил задачу определения устойчивости или моделирования подобного контура, то, следовательно, при постановке задачи исследователь не учел каких-то существенных его особенностей. Вместо того, чтобы решать такую некорректную задачу, следует уточнить модели элементов, образующих этот контур, на что косвенно указывает высвечиваемая ошибка в программе *VisSim*.

Вывод 2. Программные средства моделирования (и оптимизации при моделировании), которые вычисляют выходные сигналы регулятора по доступным его входным сигналам, такие как *VisSim*, более предпочтительны для численной оптимизации регулятора, чем средства, использующие для этих целей информацию об аналитическом виде сигнала, такие как *MATLAB*.

3. О ДОПУСТИМЫХ И НЕДОПУСТИМЫХ УПРОЩЕНИЯХ

Все элементы системы должны быть физически реализуемы.

Если система линейная, для ее описания используют аппарат передаточных функций и преобразований Лапласа. В этих терминах указанное условие формально требует, чтобы степень числителя была меньше степени знаменателя. Действительно, следует учесть, что аргумент s представляет собой некий аналог частоты. С ростом частоты передаточная функция отдельных элементов не обязательно ниспадает, но если продлить этот рост частот достаточно далеко, то передаточная функция любого реального объекта непременно ниспадет до сколь угодно малых величин.

Но выполнения данного условия недостаточно. Не достаточно, чтобы передаточная функция затухала с ростом частоты. Во всех физических объектах передаточная функция, начиная с некоторой частоты, падает до нуля. То есть для любого объекта всегда можно указать такие частоты, на которых передаточная функция не просто мала, а отклик объекта на этих частотах строго отсутствует (либо намного меньше шумов его измерения).

Вывод 3. Неотъемлемое свойство фактической модели любого реального объекта ниспадать с ростом частоты вплоть до нулевого значения следует учитывать и при моделировании и проектировании регуляторов.

Затуханием отдельных элементов можно пренебречь лишь в сравнении с затуханием других звеньев, входящих в тот же контур. Если же какое-либо звено является единственным звеном рассматриваемого контура, то в этом контуре нет других инерционных звеньев, в сравнении с которыми можно было бы пренебречь затуханием данного элемента. В этом случае указанный элемент недопустимо описывать безынерционным звеном.

Но единственная инерционность не достаточна для определения устойчивости контура. Контур с единственным звеном первого порядка всегда устойчив. Поэтому ограничиваться рассмотрением лишь отличием степени знаменателя от степени числителя также недостаточно для адекватного анализа устойчивости любого реального контура с отрицательной обратной связи. Однако если в контуре присутствует элемент запаздывания и поэтому достоверно известно, что влияние следующей постоянной времени модели на фазо-частотную характеристику (ФЧХ) существенно меньше, допускается ограничивать рассмотрение динамической части объекта элементами первого порядка.

То есть модель всех элементов контура в виде звена первого порядка и звена запаздывания может применяться при исследовании его устойчивости лишь в крайнем случае, но модель только в виде звена первого порядка не должна использоваться никогда.

Вывод 4. При исследовании контура с запаздыванием всегда степень знаменателя

передаточной функции должна быть выше, чем степень числителя.

Вывод 5. При исследовании контура без запаздывания всегда степень знаменателя передаточной функции должна быть не менее чем на два выше, чем степень числителя.

На основании указанных свойств системы следует, что оптимизация контура линейной системы, в котором порядок числителя меньше порядка знаменателя лишь на единицу и отсутствует звено чистого запаздывания, бессмысленно. Действительно, фазовый сдвиг в такой системе никогда не превышает девяносто градусов, поэтому такая система устойчива при любых сколь угодно больших коэффициентах усиления. Процедура оптимизации не сможет закончиться.

По этой же причине бессмысленна оптимизация ПИД-регулятора для объекта, в котором нет запаздывания и в котором степень числителя лишь на два меньше степени знаменателя. Действительно, дифференцирующий тракт компенсирует один порядок знаменателя, поэтому такая система теоретически остается устойчивой при любом коэффициенте усиления.

Постановка некорректной задачи оптимизации не может привести к успеху.

На практике таких объектов и таких задач не встречается, некорректность постановки задачи может возникнуть лишь в результате излишне упрощенной модели объекта. Таким образом, можно рекомендовать при любой идентификации объекта управления не ограничиваться моделью второго порядка ни при каких обстоятельствах, и идентифицировать модель, по меньшей мере, до трех основных (наибольших) постоянных времени знаменателя передаточной функции.

4. ОБОСНОВАННОСТЬ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕГУЛЯТОРА

При решении задачи оптимизации системы с моделью объекта необходима модель объекта, адекватная настолько, чтобы получаемая оптимальная для этой модели настройка регулятора оставалась оптимальной и для реального объекта. Любая модель приближительна, никакая модель не может абсолютно точно соответствовать объекту. Поэтому актуален вопрос требуемой степени приближения модели к реальному объекту: допустимая погрешность, критерии допустимости пренебрежения теми или иными параметрами модели и т. п.

Любой объект управления рассматривается лишь в ограниченной полосе частот. При этой оговорке допустимо описывать объекты моделями первого или второго порядка, так же, как и моделями, не содержащими инерционных звеньев, и даже дифференцирующими звеньями, т. е. элементами, порядок числителя передаточных функций которых выше порядка знаменателя. Но в этом случае при решении задач оптимизации *отождествлять объект и его*

модель можно лишь в указанной ограниченной области частот. В противном случае возникает кажущееся противоречие между теорией и практикой, а именно: оптимальные в теории регуляторы оказываются не оптимальными на практике и наоборот.

Зачастую иные практики говорят, что в теории все хорошо, а на практике все иначе. С таким положением смириться нельзя. Если такая ситуация имеет место, то либо теория ошибочна, либо она применена не в тех условиях, в которых справедлива.

Чтобы такого противоречия не возникало, в рассмотренном примере *следует искусственно ограничить полосу частот* в модели в соответствии с тем, как она естественным образом ограничивается в реальном объекте, либо (что более корректно) *уточнить модели в высокочастотной области* в такой достаточной степени, которая бы обеспечила совпадение теории и практики.

В теории невозможна оптимальная настройка ПИ-регулятора (и пропорционального регулятора) для объекта первого порядка и ПИД-регулятора для объектов первого и второго порядка. Это означает, что какую бы настройку мы не отыскивали, всегда остается возможность указать другую настройку, которая будет лучше по достигаемому качеству управления.

На практике же для любого без исключения объекта *всегда существует наилучшая настройка* (безотнositельно возможности ее отыскания). Это связано с тем, что *на практике не существует идеальных объектов ни первого порядка, ни второго, ни какого-либо конечного порядка* в неограниченном диапазоне частот и без учета ограничений входного воздействия. Именно эти ограничения чаще всего приводят к тому, что после достижения некоторого приемлемого качества улучшить результат уже не удастся никакими методами, и именно поэтому такое решение, которое уже нельзя улучшить, называется оптимальным. Причины существования оптимального решения можно назвать причинами ограниченности возможного быстрогодействия и качества переходного процесса. Они необязательно могут быть связаны с ограниченной величиной входного воздействия или ограниченной полосой частот: другой причиной может являться транспортное запаздывание в модели реального объекта. На практике имеются все эти причины и некоторые другие, но не все они оказывают определяющее влияние на оптимальную настройку. Которая из них начинает сказываться раньше, зависит от соотношения соответствующих величин в истинной математической модели объекта. Именно эти особенности определяют оптимальность настройки, а, следовательно, модель, не учитывающая их, непригодна для отыскания оптимального решения, а значит, и вообще непригодна.

Попытка оптимизации регулятора для объекта первого или второго порядка (т. е. без учета высших порядков, ограничения управления, запаздывания, нелинейности или еще какой-то хотя бы одной дополнительной особенности объекта) является попыткой решения задачи, не имеющей решений. В итоге может быть найдено *псевдооптимальное* решение, которое далее улучшить не удастся, но эта невозможность дальнейшего улучшения результата будет связана с возникновением некорректности моделирования. Например, шаг интегрирования будет при некотором достигнутом быстродействии замкнутой системы уже недостаточно мелким. Это породит заметное влияние параметров моделирования на результирующий процесс. На результате будет сказываться возникающее запаздывание на время одного шага интегрирования и (или) дискретность взятия отсчетов, что не имеет никакого отношения к реальному объекту и к поставленной задаче.

Но если управление объектом на практике осуществляется дискретно, и эта величина шага интегрирования войдет в модель объекта или регулятора, то такая модель будет вполне адекватна объекту: такая модель содержит запаздывание, и для нее оптимальные настройки указанных регуляторов существуют, а их поиск вполне обоснован.

5. О НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ

Часто в литературе при анализе нелинейных систем в математической модели объекта отдельно выделяют линейную часть и нелинейную часть. Далее чаще всего не заботятся о порядке включения этих частей. В действительности порядок следования нелинейной и линейной частей модели очень важен. Может оказаться, что в модели объекта имеется две или более нелинейностей, и между ними имеются линейные элементы. При моделировании следует строго соблюдать порядок соединения этих элементов в модели [7].

Также часто при исследовании таких систем используют единичные входные ступенчатые воздействия. Это неправильно. Если при анализе линейных систем может использоваться входное воздействие любой величины, поэтому единичное воздействие наиболее удобно, то в нелинейных системах следует при моделировании использовать именно такие сигналы, которые имеют место в реальной системе. Также следует вместо единственного графика вычислять семейство переходных процессов, с сигналами в том диапазоне, который характерен для реальной системы.

Метод гармонического баланса, разработанный в условиях отсутствия эффективных программно-аппаратных средств моделирования и оптимизации, в настоящее время устарел и неэффективен. Этот метод ограничивается тем, что решается вопрос о том,

имеются ли в системе колебания, или не имеются, а если имеются, то требуется лишь вычислить амплитуду и частоту первой гармоники этих колебаний. Это крайне примитивный вид анализа нелинейной системы.

Вывод 6. При исследовании нелинейных систем требуется предельно точно воспроизводить последовательность включения элементов и сигналы в системе.

6. О КРИТЕРИЯХ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ

Критерий на основе интеграла от какой-либо функции, порожденной ошибкой системы, могут составить основу критерия качества в виде стоимостной функции, то есть оптимизация должна идти по пути уменьшения этой функции. Наиболее эффективны стоимостные функции, состоящие из суммы нескольких функций [3, 4, 8]. В этом случае необходимы весовые коэффициенты, которые определяют соотношение вкладов каждого слагаемого. Весовых коэффициентов должно быть на один меньше, чем слагаемых. Действительно, если при каждом слагаемом имеется весовой коэффициент, то все их можно разделить, например, на коэффициент при первом слагаемом, от чего результат оптимизации не изменится. Поэтому один из весовых коэффициентов может быть равным единице.

К характерным ошибкам безосновательные утверждения о предпочтительности той или иной стоимостной (или целевой) функции. Действительно, цели управления зачастую отличаются, поэтому и стоимостные функции могут отличаться, универсальной и наилучшей для всех случаев стоимостной функции быть не может.

Например, в некоторых статьях утверждается, что наилучшей стоимостной функцией является интеграл на интервале времени T от квадрата ошибки $e(t)$:

$$\Psi_0(T) = \int_0^T e^2(t) dt. \quad (1)$$

Наши исследования показали, что в случае применения этой стоимостной функции в системе имеется чрезмерное количество колебаний, перерегулирование достигает 30 % и выше [3]. Кроме того, целевая функция (1) не обеспечивает достаточно быстрого устремления ошибки к нулю, то есть она не эффективна для настройки коэффициента интегрального канала ПИД-регулятора.

В работе [3] рекомендуется стоимостная функция в общем виде:

$$\Psi_1(M, N, T) = \int_0^T |e(t)|^M t^N dt. \quad (2)$$

Достаточно хорошо эта функция работает при $N = M = 1$.

Дополнительные слагаемые могут вводиться для достижения специальных требований, например, для снижения величины перерегулирования, для устранения участков, на которых ошибка возрастает по времени, и так далее [3].

В статье [1] утверждается, что «наиболее сбалансированной» является целевая функция следующего вида:

$$\Psi_2(T) = \int_0^T \{e^2(t) + k_1 \dot{e}^2(t)\} dt. \quad (3)$$

При этом данное утверждение сформулировано в отношении соотношения (3) с совершенно конкретным значением коэффициента k_1 равным $k_1 = 0,25$. Это утверждение не может быть правильным для всех случаев. Во-первых, как было сказано, модуль ошибки работает лучше квадрата ошибки, и то же самое можно утверждать в отношении модуля производной ошибки в сравнении с квадратом этой величины. Введение квадрата делает критерий нелинейным, такой критерий подавляет пиковые ошибки, но мало чувствителен к малым ошибкам управления. Во-вторых, коэффициент при втором слагаемом формально должен иметь размерность, поскольку производная имеет единицы измерения, обратно пропорциональные единицам времени. Квадрат производной имеет размерность единиц обратно пропорциональных квадрату единицы времени. Следовательно, весовой коэффициент должен иметь обратную размерность, чтобы после перемножения получались безразмерные величины. Например, выбор масштаба времени должен приводить к изменению этого коэффициента. Скажем, если процессы в системе описывались в секундах, и соотношение (3) с указанным значением работало удовлетворительно, то должно быть допустимым описание процессов, например, в миллисекундах. В этом случае единичное приращение времени уменьшится в тысячу раз, следовательно, приращение сигнала за единицу приращения также изменится в тысячу раз. Для того чтобы соотношение (3) осталось неизменным, коэффициент k_1 следует увеличить в миллион раз. Это демонстрирует, что указанный коэффициент не может быть одинаков для всех случаев.

На этом основании можно рекомендовать как более предпочтительную следующую целевую функцию:

$$\Psi_3(T) = \int_0^T \{|e(t)|^2 + k_1 |\dot{e}(t)|^2\} dt. \quad (4)$$

При этом коэффициент k_1 явно указывается в буквенном виде, а не в численном, как в статье [1], с указанием на то, что выбор этого коэффициента также должен быть сделан для данной задачи на основе некоторого обоснованного критерия. То есть соотношение (3) при фиксированном значении этого

коэффициента – это фиксированный критерий, а соотношение (4) не только отличается по степени входящих в него членов, но также отличается оговоркой о том, что коэффициент k_1 не фиксирован и также нуждается в выборе.

Кроме того, следует отметить, что и величина T , то есть время моделирования, на котором берется интегрирование, также не фиксировано. Если это время выбрано меньше, чем длительность переходного процесса, оптимизация даст ошибочный результат. Если это время существенно превышает длительность переходного процесса, целевая функция будет работать неэффективно. Кроме того, если в системе имеется статическая ошибка, то вклад остаточной ошибки при излишне большом времени интегрирования будет намного больше, чем вклад особенностей переходного процесса. Поэтому следует обеспечить выбор такого времени T , чтобы переходный процесс закончился практически на интервале, равном 70–90 % от этой величины.

О составных критериях качества достаточно сказано в работах [3, 4]. Наиболее эффективно составные критерии работают в том случае, если каждое из слагаемых отвечает за отдельный признак переходного процесса, например, одно слагаемое растет с ростом статической ошибки, другое с ростом перерегулирования, третье с ростом времени переходного процесса и так далее.

7. О ПОНЯТИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Ошибочно считается, что оптимальная система единственна для данного объекта. Неоднократно встречаются утверждения о том, что оптимальная система единственна, поскольку «оптимальная» означает «самая лучшая», а самых лучших настроек не может быть несколько.

Те, кто так считают, забывают, что в технике термин «оптимальный» означает «обеспечивающий искомый экстремум заданной целевой функции». А поскольку целевых функций может оказаться несколько, то и оптимальных настроек может быть несколько. Но даже при единственной форме целевой функции любой из весовых коэффициентов может быть изменен, что даст другой результат оптимизации. Также может быть изменено время интегрирования T , и это также породит новый оптимальный результат.

Проектировщику системы требуется помимо решения задачи оптимизации коэффициентов регулятора, также решать задачу «оптимизации критерия оптимизации». А эта задача зачастую решается путем выбора наилучшего результата из наборов оптимальных настроек [3, 4].

8. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРОВ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМЫ

Для запуска оптимизации в программе *VisSim* необходимо следующее.

1. Задать структуру проекта в виде модели регулятора и модели объекта, соединенные последовательно в кольцо. Также задать управляющие и (или) возмущающие воздействия с помощью блоков генерации требуемых функций. Как правило, используются генераторы ступенчатого скачка.

2. Задать значения оптимизируемых параметров с помощью блоков «*parameter unknown*».

3. Задать начальные (стартовые) значения каждому из этих параметров, подавая константу на вход этих блоков.

4. Обеспечить использование этих параметров в качестве коэффициентов регулятора, которые следует оптимизировать. С этой целью полезно присвоить им названия функциональных переменных (например, P, I, D – коэффициенты пропорционального, интегрального и дифференцирующего трактов). Присвоенные названия следует использовать для вызова этих функций и их использования в качестве соответствующих коэффициентов усиления. Можно использовать блоки умножителей или непосредственно блоки коэффициентов усиления.

5. Обеспечить вычисление стоимостной функции и отправку результата в блок «*cost*», который должен быть единственным в проекте. С этой целью формируется вычислитель, выход которого соединен с входом этого блока.

6. Обеспечить индикацию результата оптимизации, для чего целесообразно использовать блок индикатора значения (на выходе каждого из блоков «*parameter unknown*»).

Кроме того, можно, но необязательно отражать значение получаемого переходного процесса на блоке осциллографа и значение стоимостной функции на таком блоке и (или) на блоке индикатора численного значения.

Для оптимизации стоимостной функции необходимо решить задачу оптимизации, получить переходные процессы и принять решение о том, удовлетворительны они, или нет. Если они неудовлетворительны, следует внести такие исправления в стоимостную функцию, которые предположительно устранили бы те

недостатки переходных процессов, которые делают их неудовлетворительными [9].

9. О СТРУКТУРАХ РЕГУЛЯТОРОВ

Можно предложить множество структур регулятора [13–17]. Сопоставление различных структур регуляторов требует достаточно убедительного критерия. Действительно, при одной и той же выбранной модели объекта и различных структурах регулятора сравнение качества получаемых систем может оказаться недовольным, поскольку возможен случай наилучшего расчета параметров для худшей структуры регулятора и наихудший расчет параметров для лучшей структуры. В этом случае система с худшей структурой регулятора может продемонстрировать лучшие свойства. Для объективного сопоставления различных структур регуляторов необходимо сравнивать только оптимизированные регуляторы. То есть для сопоставления двух разных структур регуляторов для одного и того же объекта необходимо предварительно оптимизировать численные значения коэффициентов каждой из сравниваемых структур. При этом критерии оптимизации должны для обоих случаев совпадать.

На *Рис. 1* показана общая схема оптимизации регулятора. Здесь к объекту относится его передаточная функция W_2 , также сумматор, на который поступает неизвестное возмущение H , а также передаточная функция датчика выходной величины W_3 . На вход объекта поступает управляющий сигнал U , его состояние X в сумме с возмущением H дает выходную величину Y . Для измерения недоступно состояние объекта, как и выходная величина, а доступна лишь оценка выходной величины Z , формируемая на выходе датчика. К регулятору относится вычитающий элемент и элементы с передаточными функциями W_1 и W_4 . Вычислитель целевой функции (ВЦФ) служит для ее вычисления при моделировании системы. Вычислительное устройство (ВУ), задает параметры регулятора по процедуре оптимизации на основании значений целевой функции. В общем случае это – набор коэффициентов (вектор) R .

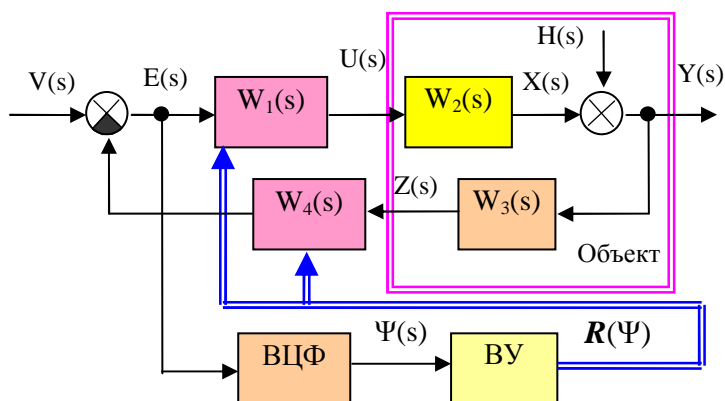


Рис. 1. Схема оптимизации регулятора САУ

Таким образом, для корректного сравнения двух различных структур регуляторов, предлагаемых для управления одним и тем же объектом, необходимо для каждой структуры по схеме, показанной на Рис. 1, вычислить оптимальный набор параметров регулятора на основании целевой функции Ψ .

Та структура, которая даст наименьшее значение целевой функции, может быть объективно названа оптимальной среди исследованного множества структур.

10. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОРРЕКТНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наиболее распространенной причиной некорректного моделирования является недостаточно малый шаг интегрирования [3, 4]. При увеличении коэффициентов регулятора быстродействие системы возрастает, поэтому после некоторого достигнутого быстродействия шаг интегрирования становится уже недостаточно малым. Это породит нарушение устойчивости системы при дальнейшем увеличении коэффициентов. На результате будет сказываться возникающее запаздывание на время одного шага интегрирования и (или) дискретность взятия отсчетов, не имеющее места в реальном объекте. С целью корректного моделирования в таком случае необходимо уменьшить шаг интегрирования, и в результате возникнет возможность дальнейшего повышения коэффициентов регулятора.

Адекватность модели объекту предварительно проверяется не по достаточной близости переходных процессов в разомкнутом контуре, а по наличию учета не менее двух факторов (инерционных, трансцендентных и нелинейных звеньев) в каждом оптимизируемом контуре. Окончательная проверка осуществляется по совпадению результатов аналитической или модельной оптимизации с результатами применения получаемых систем на практике.

Обоснованность критерия требует наличия технического смысла в задаче минимизации выбранного функционала и наличия минимума этого функционала.

Корректность моделирования обеспечивается правильным выбором программного продукта, знанием основ теории автоматического управления и применением ряда критических проверок правильности работы выбранного программного продукта.

Подавление влияния шумов, статической ошибки и других нежелательных факторов реального объекта на результат реальной оптимизации обеспечивается введением в критерий оптимальности нечувствительности к ошибкам и шумам, лежащим ниже допустимого значения для них. Ошибка стабилизации в пределах допустимых уровней не должна увеличивать стоимостную функцию. Ее значение

при этих условиях также не должно сказываться на результат оптимизации регулятора.

Сохранение корректности при моделировании получаемых нелинейных систем достигается учетом и применением реальных величин всех сигналов.

Проверка обоснованности модели и корректности моделирования должна быть в итоге осуществлена по следующему главному принципу: Переходные процессы в модели и в практической системе с регуляторами, полученными процедурой оптимизации, должны совпадать; это должно выполняться также и в случае, когда в рассчитанном оптимальном регуляторе несущественно (на величину менее 0,1%) изменены любые его коэффициенты.

Нечувствительность результата к малым девиациям параметров регулятора, называемая «грубостью решения», робастностью. Оно является положительным свойством этого решения, в отличие от «негрубого решения», чувствительного к точной настройке параметров. Проверка обеспечения грубости решения также может быть осуществлена введением тестовых небольших отклонений параметров, которые не должны существенно менять результат работы реальной системы.

Тестовая проверка оптимальности получаемой системы может быть осуществлена введением пробных больших отклонений параметров, более значительной, чем для проверки робастности решения. Любое изменение параметров по отношению к оптимальной настройке должно только ухудшать совокупность положительных свойств системы по сравнению со свойствами оптимальной системы. Формально любое изменение любого коэффициента регулятора должно приводить к увеличению стоимостной функции. Такая проверка весьма показательна, но, к сожалению, ссылки на то, что она проводилась, в литературе практически не встречаются. Эта проверка должна применяться не к модели (или не только к модели), но и к реальному объекту, что намного важнее.

Обоснованность целевых функционалов проверяется оценкой получаемых переходных процессов и сравнением их с вариантами, получаемыми другими методами или с другими целевыми функционалами.

11. О МОДИФИКАЦИЯХ УПРЕДИТЕЛЯ СМИТА

В работе [1] детально обсуждается упредитель Смита и его модификация.

Следует отметить, что модификация этого упредителя в форме обводного канала достаточно универсальна [10–12, 18] и обладает существенно увеличенными возможностями, вследствие чего частные модификации упредителя Смита уже не актуальны. Отличия упредителя Смита и обводного канала детально рассмотрены в работе [10, 18].

Упредитель Смита (УС), как и обводной канал, включается параллельно объекту.

Пусть объект описывается уравнением следующего вида:

$$Y(s) = W_0(s) \exp(-\tau s) U(s) + H(s), \quad (5)$$

где s – аргумент преобразования Лапласа; τ – постоянная времени звена запаздывания; $W_0(s)$ – инерционная часть модели объекта; $Y(s)$, $U(s)$ – выходной и входной сигналы объекта; $H(s)$ –

возмущающее воздействие, недоступное измерению; $V(s)$ – предписанное значение для $Y(s)$ (задание); $E(s)$ – ошибка управления; $X(s)$, $Z(s)$ – промежуточные величины состояний объекта и регулятора.

Применение упредителя Смита позволяет в системах, имеющих структуру *Рис. 2*, осуществлять простое и эффективное управление, но этот метод управления далеко не идеален.

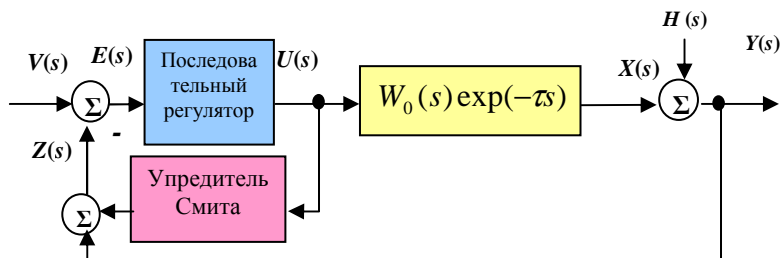


Рис. 2. Структурная схема системы с упредителем Смита

Модель упредителя Смита $W_{US}(s)$ однозначно связана с моделью объекта регулирования следующим соотношением:

$$W_{US}(s) = W_0(s) [1 - \exp(-\tau s)]. \quad (6)$$

Сложив передаточную функцию объекта, равную отношению $Y(s)/U(s)$ при $H(s) = 0$ из уравнения (5), с передаточной функцией упредителя Смита $W_{US}(s)$ из уравнения (6), получим модель суммы двух трактов, один из которых относится к реальному объекту, а другой является виртуальным, формируемым в структуре регулятора:

$$W_{\Sigma}(s) = W_{US}(s) + W_0(s) \exp(-\tau s) = W_0(s). \quad (7)$$

Если модель реального объекта не содержит запаздывания, то УС не нужен (а его передаточная функция получается равной нулю). Если инерционная часть объекта $W_0(s)$ далека от желаемого вида, например, является фильтром высокого порядка или резонансным фильтром, то применение УС, рассчитанного по рассмотренной методике, неэффективно. В любой из этих ситуаций УС бесполезен.

Целью введения обводного канала (ОК) является отнюдь не обязательно компенсация запаздывания объекта. Обобщенно принципы его проектирования можно сформулировать в виде следующих требований.

Высокочастотная часть ОК должна быть такой, чтобы обеспечить относительно малую инерционность, желательно, чтобы затухание АЧХ получаемого композитного объекта в ВЧ области соответствовало обратно пропорциональной зависимости от частоты (первого порядка). Управление объектом с такими свойствами в ВЧ области осуществляется наиболее просто. Низкочастотная часть ОК должна быть такой, чтобы минимально влиять на погрешность системы, т. е. в НЧ области передаточная функция ОК должна быть нулевой. Практически, начиная со средних частот, после

того, как передаточная функция ОК сравнивается с передаточной функцией объекта, она должна как можно быстрее затухать до пренебрежимо малого значения.

Очевидно, ОК может быть использован и в случае, если объект не содержит чистого запаздывания, и в случае, если инерционная часть объекта далека от идеального, в частности является фильтром высокого порядка, и в случае сочетания обоих этих факторов.

Модификация Хуанга для УС рассматривается, в частности, в работе [1], со ссылками на первоисточник. В этой модификации во второй канал добавляется фильтр $W_F(s)$. То есть уравнение УС в модификации Хуанга имеет следующий вид:

$$W_{\Sigma}(s) = W_{US}(s) + W_0(s) W_F(s) \exp(-\tau s) = W_0(s). \quad (8)$$

Очевидно, что данная модификация не имеет существенных преимуществ, в ней сохраняются указанные недостатки УС. Поэтому такая модификация УС при наличии такого технического решения, как ОК, уже не актуальна.

12. ИСТОЧНИК ЧИСЛЕННЫХ ПРИМЕРОВ

В работе [1] решается задача управления объектом, описываемым как последовательно соединенные два одинаковых фильтра первого порядка и звено чистого запаздывания. При этом утверждается, что чем больше отношение постоянной времени звена запаздывания к постоянной времени фильтра, тем сложнее рассчитать регулятор для такого объекта. Данная статья не вызывает большого доверия, поскольку в ней, как указывалось выше, необоснованно утверждается, что целевая функция (3) со значением $k_1 = 0,25$ является безусловно наилучшей (не зависимо от параметров модели объекта и от технических требований, предъявляемых к системе). Также в статье обсуждается модификация УС без упоминания о

существовании других более эффективных решений, таких как ОК. Дополнительные сомнения вызывает указание в этой статье на то, что динамика объекта в виде фильтра второго порядка с запаздыванием подобна динамике объекта в виде фильтра первого порядка с запаздыванием. На самом деле динамика таких объектов существенно отличается. В частности, не понятно, почему для примера принята модель в следующем виде:

$$W_{02}(s) = \frac{1}{(4,7s + 1)^2} \exp(-\tau_2 s). \quad (9)$$

Не понятен выбор $T_2 = 4,7$ с. Для исследования методов оптимизации можно было положить постоянную времени равной единице, $T_2 = 1$ с, что в данном случае не принципиально, так как лишь задает масштаб времени. Что действительно важно, так это соотношение между этой постоянной времени и постоянной времени звена запаздывания, то есть T_2/τ_2 , либо обратная величина.

Утверждается, что динамика данного звена (9) эквивалентна динамике следующего звена:

$$W_0(s) = \frac{1}{(6,386s + 1)} \exp(-\tau_0 s). \quad (10)$$

При этом

$$\tau_{20} = \tau_0 - 2,61. \quad (11)$$

Окончательно подрывает доверие к авторам этой статьи [1] соотношение, в котором τ_0 изменяется от 1 до 9 в совокупности с соотношением (11). В этом случае величина τ_{20} при изменении τ_0 от 1 до 1,6 принимает отрицательное значение, что в принципе не может быть для звена запаздывания.

В работе [1] не вполне ясна задача исследования и использованный метод. Авторы ставят задачу в следующем виде: «Необходимо определить эталонную модель объекта и соответствующую ей модель инерционного звена с запаздыванием для настройки регуляторов; границы неопределенности параметров для исследования робастности и критерии качества переходных процессов; выбрать оптимальный метод синтеза регуляторов ПИД-семейства, целесообразность использования упредителя Смита с модификацией Хуанга; целесообразность использования специальных регуляторов».

В отношении «специальных регуляторов» у авторов ничего не получилось. Специальными регуляторами называются «МРС-регуляторы», про которых в выводах сказано: «МРС-регулятор не обеспечивает достаточной робастности для объектов со значительным временем запаздывания». При этом остается не раскрытым термин «значительное время запаздывания».

В отношении «эталонной модели объекта» и «соответствующей ей модели инерционного звена с запаздыванием» также осталось неясным, что авторы имеют в виду.

В литературе, как правило, терминология такова:

а) фактическая (реальная) модель объекта – это математическое описание зависимости между входным и выходным сигналами объекта, которая не известна исследователю, а лишь реализуется в реальном объекте;

б) используемая для расчета регулятора модель, которая принята на основе теории или по результатам идентификации объекта, или просто «модель объекта»;

в) эталонная модель системы - математическая зависимость между заданием и выходным сигналом, которая принята за идеальный вариант системы; при решении задачи управления принимаются меры для того, чтобы поведение системы было как можно более похожим на поведение этой эталонной модели системы;

г) эталонная модель объекта – идеальное представление о том, как должен вести себя объект в виде модели, описываемой зависимостью между входными сигналами управления, поступающими на объект и его выходными сигналами.

В данной статье не может быть речи об эталонных моделях (в) и (г), поскольку речь о них ведется лишь при использовании специальной структуры управления «с эталонной моделью», чего в данном случае нет. Поэтому термин «эталонная модель» в данной статье не понятен.

При постановке задачи задается диапазон изменения величины τ_0 в девять раз (от номинального значения до значения в 9 раз больше), величины T_2 и τ_2 в три раза (от половинного значения до полуторного).

Можно было бы предположить, что, например, модель (9) является фактической моделью объекта, а модель (10) является его расчетной моделью, или наоборот, модель (10) фактическая, а модель (9) расчетная. Но оба эти предположения опровергаются схемой моделирования, поскольку в ней модель (9) используется и как модель фактического объекта, и как используемая модель, поскольку она же фигурирует в структуре упредителя Смита.

Если ставить задачу исследования того, насколько значительно на результат оптимизации является ошибочная идентификация объекта, например, принятие модели (9) для объекта с фактической моделью (10), или наоборот, принятие модели (10) для объекта (9), то следовало именно так и формулировать цель исследования.

Поэтому целесообразно исследовать возможности управления каждым из объектов, как объектом (9), так и объектом (10) в условиях изменений параметров их модели в указанных диапазонах.

13. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ИЗ ИСТОЧНИКА ПРИМЕРОВ

Для демонстрации наличия достаточного арсенала средств решения задачи, рассматриваемой в работе [1] решим две нижеследующие задачи.

Пример 1. Решим задачу оптимизации ПИД-регулятора для объекта (9) при условии, что его параметры изменяются, как сказано в предыдущей главе, то есть постоянная времени фильтра от половинного значения до полуторного, а постоянная времени звена запаздывания от номинального значения до девятикратного.

В соответствии с предложенным нами способом проектирования робастных регуляторов [13], осуществим оптимизацию регулятора для худших сочетаний параметров объекта, после чего проверим, как ведет себя система с лучшим сочетанием параметров.

На *Рис. 3* показана структура для оптимизации ПИД-регулятора. Структура регулятора показана на *Рис. 4*. Структура объекта показана на *Рис. 5*. Целевая функция используется такая же, как в работе [19]. Результатом оптимизации являются найденные коэффициенты ПИД-регулятора: $k_p = 1,05$; $k_i = 0,053$; $k_d = 5,38$. Переходные процессы показаны на *Рис. 6*.

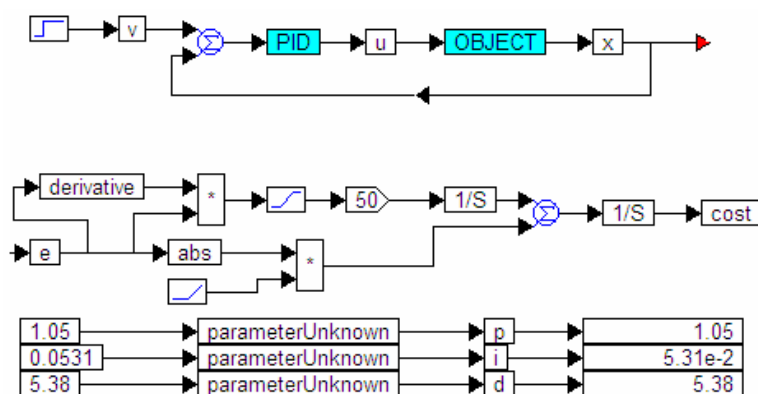


Рис. 3. Структура для оптимизации регулятора по Примеру 1

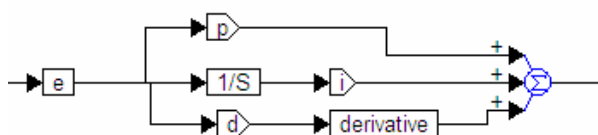


Рис. 4. Структура ПИД-регулятора

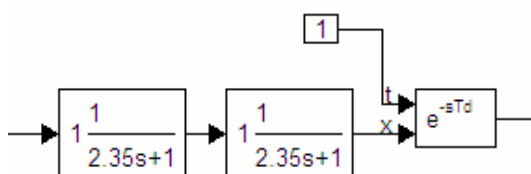


Рис. 5. Структура объекта по Примеру 1

Как видим, система остается устойчивой при всех осуществленных испытаниях, тенденция изменений свойств переходного процесса достаточно наглядна. Это позволяет утверждать, что при промежуточных значениях параметров модели объекта переходные процессы будут иметь промежуточный вид.

Отметим, что параметры модели объекта изменялись совместно, при этом не были проверены сочетания, например, наибольшего значения постоянной времени фильтра с наименьшим значением постоянной времени звена запаздывания, или наоборот, но в данном случае это полностью совпадает с условиями исследований, описанными в статье [1].

Детальное исследование требует проверить систему и при указанных сочетаниях параметров.

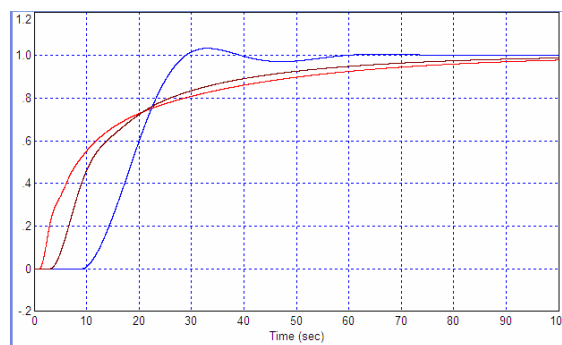


Рис. 6. Переходные процессы в системе Примера 1 с рассчитанным регулятором при максимальных значениях постоянных времени (синяя линия), минимальных значениях (красная линия) и средних значениях (черная линия)

В двух случаях перерегулирование отсутствует, в худшем случае оно не превышает 2%. Длительность процесса не превышает 90 с. Этот результат намного лучше, чем результаты, полученные в статье [1], при том, что структура регулятора намного проще, так как использован простой ПИД-регулятор, без каких-либо упредителей. Действительно, во всех результатах в этой статье длительность переходного процесса более 200 с, кроме результата «с модельно прогнозирующим регулятором», который, по

утверждению авторов, не обладает робастностью и характеризуется большой статической ошибкой, чего в нашем решении не имеет места.

Пример 2. Решим задачу оптимизации ПИД-регулятора для объекта (10) при условии тех же условиях

В соответствии с предложенным нами способом проектирования робастных регуляторов [13], осуществим оптимизацию регулятора для худших сочетаний параметров объекта, после чего проверим, как ведет себя система с лучшим сочетанием параметров.

Структура для оптимизации ПИД-регулятора такая же, как в предыдущем примере. Структура регулятора такая же. Структура объекта не показана, так как она достаточно ясна из соотношения (10). Целевая функция используется такая же, как в предыдущем примере. Результатом оптимизации являются найденные коэффициенты ПИД-регулятора: $k_p = 1,03$; $k_i = 0,069$; $k_d = 2,89$. Переходные процессы показаны на Рис. 7. Отметим, что эти процессы лишь в целом похожи на процессы Примера 1, но в деталях заметно отличаются. Также отметим, что и результат расчета регулятора также отличается, в особенности коэффициент дифференцирующего тракта, который отличается почти вдвое. Также очевидно, что при минимальных значениях постоянных времени объекта наблюдается высокочастотные колебания в переходном процессе, хотя система остается устойчивой и по формальным признакам переходный процесс вполне приемлемый: длительность процесса не превышает 80 с, перерегулирование в двух случаях отсутствует, в худшем случае имеется незначительное, около 1 %.

Можно уменьшить отмеченные колебания. С этой целью осуществим оптимизацию объекта не самыми худшими параметрами, а с несколько улучшенным, а именно: постоянную времени звена запаздывания возьмем равной не 9 с, а 7 с. Найденные коэффициенты ПИД-регулятора: $k_p = 1$; $k_i = 0,08$; $k_d = 2,2$. Соответствующие переходные процессы показаны на Рис. 8. В процессах при меньших значениях параметров объекта колебания практически устранены. Но при больших значениях возросло перерегулирование до величины около 10 %. Визуально этот результат лучше, но формально можно предпочесть предыдущий результат, поскольку в нем перерегулирование меньше. Выбор зависит от технических требований и условий эксплуатации системы.

Этот результат также лучше того, который приводится в статье [1].

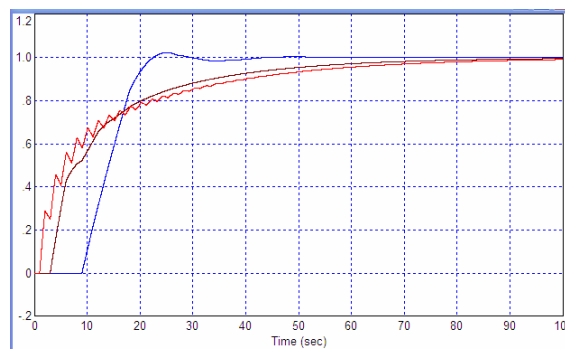


Рис. 7. Переходные процессы в системе Примера 2 с рассчитанным регулятором при максимальных значениях постоянных времени (синяя линия), минимальных значениях (красная линия) и средних значениях (черная линия)

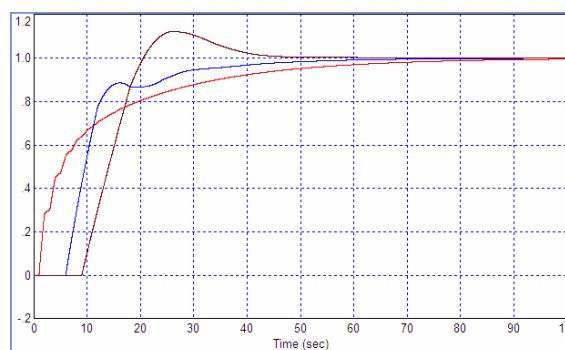


Рис. 8. Переходные процессы в системе Примера 2 с откорректированными значениями параметров регулятора при максимальных значениях постоянных времени (синяя линия), минимальных значениях (красная линия) и средних значениях (черная линия)

14. О ТОЧКЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ПОМЕХИ

В статье [1] кроме прочего точка приложения помехи выбрана на входе управляющего сигнала. В общем случае для анализа свойств системы такое «тестовое воздействие» не корректно. Обычно точка приложения помехи — на выходе объекта, то есть через сумматор, находящийся между выходом объекта и выходом системы. Это более правильно, поскольку в первом случае объект, действуя как фильтр, подавляет это возмущение сам по себе, поэтому нагрузка на контур обратной связи существенно уменьшается. Для иллюстрации в системе по Примеру 2 промоделируем переходный процесс при двух указанных видах помехи. На Рис. 9 показаны два переходных процесса: а) при подаче помехи на вход объекта (синяя линия); б) при подаче помехи на выход объекта (красная линия).

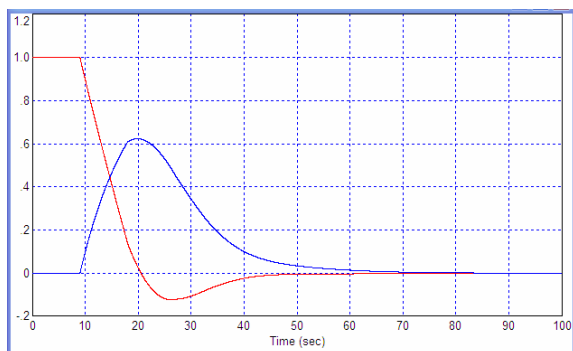


Рис. 9. Два переходных процесса в системе по Примеру 2: а) при подаче помехи на вход объекта (синяя линия); б) при подаче помехи на выход объекта (красная линия).

В первом случае ошибка скачком становится равной единице, то есть 100 % от помехи. Эта ошибка имеет место на протяжении времени, равному постоянной времени звена запаздывания. По истечении этого времени ошибка начинает медленно уменьшаться, далее достигает нуля, меняет знак и затем снижается до нуля.

Во втором случае весь период времени, равный постоянной времени запаздывания, ошибка равна нулю. Лишь после этого она плавно нарастает до 60 % от помехи, после чего плавно распадается до нулевого значения. Переходный процесс оканчивается приблизительно за то же время, но поскольку ошибка возникает позже, время ее существования короче. То есть второй вариант намного мягче, это щадящий режим эксплуатации системы, он дает меньше информации о качестве системы. Если на управляющий вход подать ступенчатое воздействие, ошибка будет изменяться так же, как в первом случае (с обратным знаком, но с такой же величиной и с такой же формой графика). Поэтому только такой способ тестирования системы достаточно корректен и нагляден.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В статье обсуждены некоторые характерные ошибки при решении задачи численной оптимизации регуляторов для одноконтурной системы автоматического регулирования. Дана критика статьи, решающей эту задачу для объектов запаздывания, на численных примерах показано, что устаревшие методы решения задач дают худшие результаты более высокой ценой.

Устаревшие табличные методы проектирования регуляторов следует изъять из арсенала теории автоматического управления вследствие их необоснованности, неэффективности, худших результатов.

Предиктор Смита заметно уступает возможностям обводного канала, это касается также и предиктора по модификации Хунга.

Еще раз подтверждена эффективность метода синтеза робастных регуляторов путем использования гипотезы о худшем сочетании параметров модели объекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности», проект № 471.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.А. Стопакевич, А.А. Стопакевич. Проектирование робастных регуляторов объектами с большим запаздыванием. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. 1 / 2 (79). С. 48–56. ISSN 1729-3734.
- [2] Мишанов М.С., Гладышев И.С., Байдали С.А. Методы расчета регуляторов в одноконтурных САУ. С. 396–397. URL: www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2011/C01/V02/193.pdf
- [3] В.А. Жмудь. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск. Издательство НГТУ. 2012. – 335 р. ISBN 978-5-7782-2162-8
- [4] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления в среде VisSim // Труды семинара по автоматике и программной инженерии, посвященного юбилею ОАО «Новосибирский институт программных систем» (ОАО «НИПС») 16.04.2012, Новосибирск, типогр. ЗАО «КАНТ». С.90–140. – с сайта. URL: http://www.nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=140&Itemid=303/
- [5] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. пособие / Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. – 116 с.
- [6] Zhmud V.A., Liapidevskiy A.V. The Design of the Feedback Systems by Means of the Modeling and Optimization in the Program VisSim 5.6/6.0 // Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24–26, 2010 Phuket, Thailand. PP. 27–32.
- [7] Ишимцев Р. Ю., Жмудь В. А., Семибаламут В. М. Оптимизация нелинейных ПИД-регуляторов // Сб. науч. тр. НГТУ. 2008. № 3 (53). С. 13–16.
- [8] Ишимцев Р.Ю., Жмудь В.А. Применение составных интегральных критериев для оптимизации регуляторов линейных объектов. Материалы IX международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2008. Новосибирск, т.7, 2008. с. 151-154.
- [9] Воевода А. А., Жмудь В. А. Сходимость алгоритмов оптимизации регулятора для объекта с ограничителем и с запаздыванием // Научный вестник НГТУ. 2007. № 4 (29). С.179–184.
- [10] Ишимцев Р. Ю., Воевода А. А., Жмудь В. А. Обводной канал для САУ скалярных и многомерных объектов: сравнение с упредителем Смита // Сб. науч. тр. НГТУ. 2008. № 2 (52). С. 11–22.
- [11] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, Р.Ю. Ишимцев. Регулятор для системы с обратной связью. Патент РФ RU 2368933 С1. G05B 11/14. Оpubл.27.09.09. Бюл. № 27. Заявка № 2008110243, Правообладатель: Институт лазерной физики СО РАН.

- [12] Жмудь В. А. Прецизионные системы управления лазерным излучением: Учеб. пособие / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2005. 152 с.
- [13] В.А. Жмудь, Загорин А. Н. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью. Патент на изобретение № 2554291. Приоритет от 01.04.14. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27.06.15. Бюллетень № 18. Срок действия патента истекает 01.04.34. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, G01P 3/36.
- [14] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2540461. Заявка № 2013145173, приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 19 декабря 2014 г. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюлл. № 4.
- [15] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2541684. Заявка № 2013146115, приоритет от 15.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 15 января 2015 г. Срок действия патента истекает 25.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюлл. № 5.
- [16] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2566339. Приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 20 октября 2015 г. Бюлл. № 29. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36.
- [17] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2584925. Приоритет от 05.03.15. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27.04.16. Бюллетень № 14. Срок действия патента истекает 05.03.35. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, G01P 3/36.
- [18] В.А. Жмудь, Л.В. Димитров, В.Г. Трубин. Использование обводного канала для управления с обратной связью колебательным объектом, известным как сложный для управления объект. НГТУ, Новосибирск, Россия; Технический университет Софии, София, Болгария. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 2 (16). С. 22–29.
- [19] В.А. Жмудь, Л.В. Димитров. Выбор характеристических полиномов замкнутой системы автоматического управления высокого порядка. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), технический университет Софии (София, Болгария). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 2 (16). С. 32–43.



Вадим Аркадьевич Жмудь, заведующий кафедрой Автоматики в Новосибирском государственном техническом университете, <http://en.nstu.ru/> (Новосибирск, Россия), доктор технических наук, доцент, ведущий научный специалист Института лазерной физики СО РАН, <http://www.laser.nsc.ru/defeng.htm>, (Новосибирск, Россия), автор более чем 300 научных работ, включая более 20 патентов, 12 учебных пособий. E-mail: zhmud@corp.nstu.ru



Любомир Ванков Димитров, декан машиностроительного факультета Технического университета Софии, <http://ftp.tu-sofia.bg/upravlenie/deans-bg.htm> доктор наук, профессор, автор более 200 научных статей. Область исследований: мехатроника, автоматика, микроэлектронные модули и системы и их применение (MEMS). E-mail: lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg

Main Mistakes When Optimizing Controllers for Closed-Loop Control Systems

V. A. ZHMUD, L. V. DIMITROV

Abstract: Design of controllers (regulators) for closed-loop dynamic control systems has been discussed in many papers. There is big lot of publications, even though, according to the author opinion, for most examples illustrating the problems in these papers and for the results in them, sufficient arsenal of methods and techniques has been already developed. It is important to divide group of the tasks which have not yet been resolved from the tasks which disision is already done. Also, it is advisable to select a class of problems, the solution of which is not required as a result of their incorrect statement. It is also important to distinguish between methods that are themselves completely outdated and methods that contain significant potential. Modification of outdated methods that do not result in a significant increase in their capacity, while there are more effective methods to solve the same problems, apparently, is not suitable. Of course, it is impossible and inappropriate to impose a ban on the publication of irrelevant papers or papers in which the authors use false reasoning, consciously or unconsciously ignore the existence of more efficient methods of solving problems than those about which they talk. But the need for classification, to distinguish actual problems from irrelevant examples and effective methods from ineffective ones, apparently badly overdue. This paper is an attempt of such a classification and gives the reasons for it.

Key words: Automation, optimization, simulation, management, regulators, controllers, PID

REFERENCES

- [1] A.A. Stopakevich, A.A. Stopakevich. Proektirovanie robstnyh reguljatorov ob'ektami s bol'shim zapazdyvaniem. Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij. 2016. 1 / 2 (79). S. 48–56. ISSN 1729-3734.
- [2] Mishanov M.S., Gladyshev I.S., Bajdali S.A. Metody rascheta reguljatorov v odnokonturnyh SAU. S. 396–397. URL: www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2011/C01/V02/193.pdf
- [3] V.A. Zhmud. Modelirovanie, issledovanie i optimizacija zamknytyh sistem avtomaticheskogo upravlenija. Monografija. Novosibirsk. Izdatel'stvo NGTU. 2012. – 335 p. ISBN 978-5-7782-2162-8
- [4] Zhmud V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem

- upravljenja v srede VisSim // Trudy seminarov po avtomatiki i programmnoj inzhenerii, posvjashhennogo jubileju OAO «Novosibirskij institut programmyh sistem» (OAO «NIPS») 16.04.2012, Novosibirsk, tipogr. ZAO «KANT». S.90–140. – s sajta. URL: http://www.nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=140&Itemid=303/
- [5] Zhmud V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija lazernym izlucheniem v srede VisSim: ucheb. posobie / Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2009. – 116 c.
- [6] Zhmud V.A., Liapidevskiy A.V. The Design of the Feedback Systems by Means of the Modeling and Optimization in the Program VisSim 5.6/6.0 // Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24–26, 2010 Phuket, Thailand. PP. 27–32.
- [7] Ishimcev R. Ju., Zhmud' V. A., Semibalamut V. M. Optimizacija nelinejnyh PID-reguljatorov // Sb. nauch. tr. NGTU. 2008. № 3 (53). S. 13–16.
- [8] Ishimcev R.Ju., Zhmud V.A. Primenenie sostavnyh integral'nyh kriteriev dlja optimizacii reguljatorov linejnyh ob'ektov. Materialy IX mezhdunarodnoj konferencii «Aktual'nye problemy jelektronnogo priborostroenija» APJeP-2008. Novosibirsk, t.7, 2008. s. 151-154.
- [9] Voevoda A. A., Zhmud V. A. Shodimost' algoritmov optimizacii reguljatora dlja ob'ekta s ogranichitelem i s zapazdyvaniem // Nauchnyj vestnik NGTU. 2007. № 4 (29). S.179–184.
- [10] Ishimtsev R. Ju., Voevoda A. A., Zhmud V. A. Obvodnoj kanal dlja SAU skaljarnyh i mnogomernyh ob'ektov: sravnenie s upreditelem Smita // Sb. nauch. tr. NGTU. 2008. № 2 (52). S. 11–22.
- [11] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, R.Ju. Ishimtsev. Reguljator dlja sistemy s obratnoj svjaz'ju. Patent RF RU 2368933 S1. G05B 11/14. Opubl.27.09.09. Bjul. № 27. Zajavka № 2008110243, Pravoobladatel': Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [12] Zhmud V. A. Precizionnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem: Ucheb. posobie / Novosib. gos. un-t. Novosibirsk, 2005. 152 s.
- [13] V.A. Zhmud, Zavorin A. N. Struktura modeli dlja optimizacii sistemy s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2554291. Prioritet ot 01.04.14. Zaregistrirvano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 27.06.15. Bjulleten' № 18. Srok dejstvija patenta istekaet 01.04.34. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, G01P 3/36.
- [14] V.A. Zhmud. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2540461. Zajavka № 2013145173, prioritet ot 08.10.2013. Zaregistrirvano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 19 dekabnja 2014 g. Srok dejstvija patenta istekaet 08.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36. Bjull. № 4.
- [15] V.A. Zhmud. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2541684. Zajavka № 2013146115, prioritet ot 15.10.2013. Zaregistrirvano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 15 janvarja 2015 g. Srok dejstvija patenta istekaet 25.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36. Bjull. № 5.
- [16] V.A. Zhmud. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2566339. Prioritet ot 08.10.2013. Zaregistrirvano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 20 oktjabnja 2015 g. Bjull. № 29. Srok dejstvija patenta istekaet 08.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36.
- [17] V.A. Zhmud. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2584925. Prioritet ot 05.03.15. Zaregistrirvano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 27.04.16. Bjulleten' № 14. Srok dejstvija patenta istekaet 05.03.35. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, G01P 3/36.
- [18] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, V.G. Trubin. Ispol'zovanie obvodnogo kanala dlja upravlenija s obratnoj svjaz'ju kolebatel'nyh ob'ektom, izvestnym kak slozhnyj dlja upravlenija ob'ekt. NGTU, Novosibirsk, Rossija; Tehniceskij universitet Sofii, Sofija, Bolgarija. Avtomatika i programmnaja inzhenerija. Avtomatika i programmnaja inzhenerija. 2016. № 2 (16). S. 22–29.
- [19] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. Vybory harakteristiceskix polinomov zamknoj sistemy avtomaticeskogo upravlenija vysokogo porjadka. FGBOU VO NGTU (Novosibirsk, Rossija), tehniceskij univetsitet Sofii (Sofija, Bolgarija). Avtomatika i programmnaja inzhenerija. 2016. № 2 (16). S. 32–43.