

Структуры и методы цифрового управления колебательными объектами

Вадим А. Жмудь, Владимир М. Семибаламут, Любомир В. Димитров
Институт лазерной физики СО РАН, Россия; Сибирское отделение геофизической службы СО РАН, Россия; НГТУ, Россия; Технический университет Софии, Болгария

Аннотация: Актуальность задачи управления объектами, склонными к колебаниям, несомненна. И все же она до сих пор успешно не решена, если не считать отдельных примеров. В частности, представляет большой интерес задача управления объектом, в числителе или в знаменателе передаточной функции которого имеется отрицательный коэффициент. Эта задача тем более усложняется, если отрицательный коэффициент имеется и в числителе, и в знаменателе. Эта задача может решаться различными методами, среди которых целесообразно отметить использование обводного канала, использование компенсатора, применение переключающегося регулятора, применение дополнительного внешнего контура регулирования, применение фильтра на входе задания. В статье разбираются эти методы, демонстрируются их достоинства и недостатки путем моделирования. Показано, что выбор метода интегрирования при моделировании интеграторов и дифференцирующих устройств может существенно повлиять на результат моделирования и оптимизации. Это необходимо учитывать при выборе алгоритма работы цифрового регулятора, поскольку без выбора метода интегрирования алгоритм управления не полон и действовать не может. Если же расчет регулятора осуществлен без учета выбора этого метода, то результаты его использования не совпадут, по меньшей мере, вследствие этого несовпадения методов вычисления интегралов и производных использующихся сигналов. Показано, что не представляется возможным выбрать наилучший метод интегрирования, поскольку из двух наиболее подходящих методов, а именно, простого метода Эйлера и адаптивного метода Булири-Стоера, каждый имеет как достоинства, так и недостатки, которые также обсуждаются в статье.

Ключевые слова: управление, замкнутые контуры, регуляторы, проектирование управляющих систем, цифровое управление, обратная связь, оптимизация

ВВЕДЕНИЕ

Управление колебательным объектом крайне актуально.

Первую проблему, и наиболее существенную, представляет обратное перерегулирование, то есть движение выходного сигнала на каком-то участке переходного процесса в сторону, обратную предписанному значению, причем с удалением от требуемой величины на величину, больше, чем стартовое значение. Эта ситуация показана на Рис. 1. Принять систему с обратным перерегулированием в эксплуатацию можно лишь в исключительных случаях, когда другого пути

управления объектом не найдено. Действительно, например, требуется охладить объект. Трудно убедить заказчика (потенциального пользователя системы) в том, что ситуация, когда на каком-то начальном участке вместо охлаждения осуществляется нагревание этого объекта. В некоторых случаях такая работа системы может попросту загубить объект (как, например, в случае использования полупроводникового лазера или какого-либо сложного оптического кристаллического элемента). Видится логичным, что обратное перерегулирование даже на небольшую величину недопустимо.

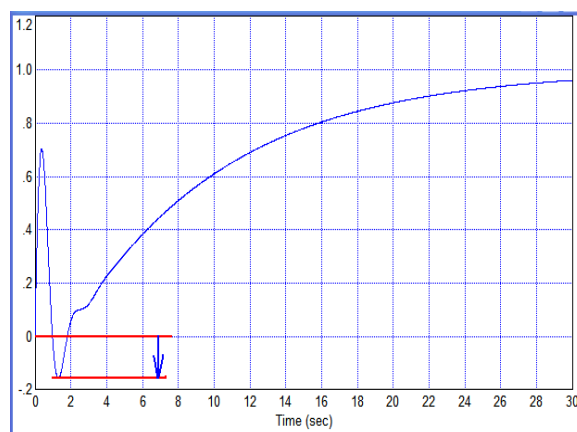


Рис. 1. Обратное перерегулирование (здесь около 17 %)

Второй проблемой является большое прямое перерегулирование. Эта величина соответствует выбросу переходного процесса за предписанное значение, как показано на Рис. 2.

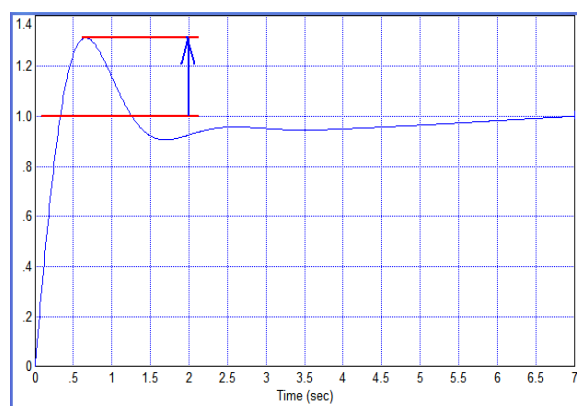


Рис. 2. Прямое перерегулирование (здесь около 30 %)

Небольшое перерегулирование не всегда является проблемой. Перерегулирование менее 5 % допускается в большинстве случаев, иногда в литературе встречаются примеры, когда допустимым считается даже перерегулирование 30 %, но эти примеры редки. Имеются также примеры, когда даже небольшая величина перерегулирования недопустима.

Третьей проблемой является большое количество колебаний в переходном процессе. Если даже амплитуда колебаний затухает, но это затухание недостаточно быстро, например, выходной сигнал осуществляет более трех существенных колебаний около предписанного состояния, как показано на *Рис. 3*, то систему едва ли можно охарактеризовать как удовлетворительную.

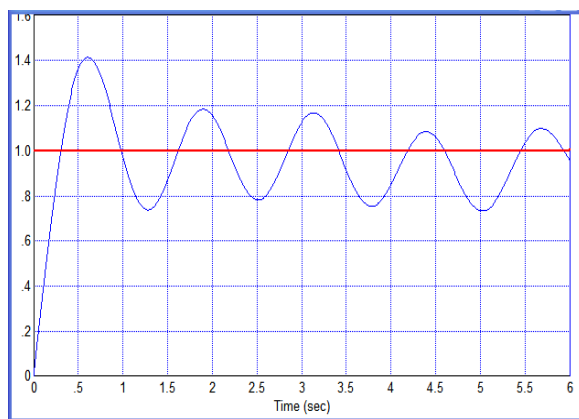


Рис. 3. Колебания около предписанного состояния (здесь более пяти 30 %)

Четвертой проблемой является значительный обратный ход, как показано на *Рис. 4*. Если в переходном процессе нет обратного перерегулирования, прямого перерегулирования и колебаний, то процесс может быть сочтен удовлетворительным. Но если при этом имеется обратный ход, как показано на *Рис. 4*, в ряде случаев это может быть оценено как признак неудовлетворительного переходного процесса, хотя, формально, по первым трем показателям, система чуть ли не идеальна. Вопрос о допустимости обратного хода следует решать исходя из технических требований к системе: в некоторых случаях он может оказаться вполне допустимым, а в других случаях категорически недопустимым. Проблема обратного хода редко обсуждается в литературе, поэтому в данной статье ей уделяется особое внимание.

Вне этого списка стоит такая проблема как отсутствие устойчивости. Если выходной сигнал объекта с течением времени не стремится к предписанному состоянию, а напротив, удаляется от него, такая система неприемлема, и говорить о её качестве не приходится. Управление объектом предполагает отыскание такого регулятора, при

котором переходные процессы в системе будут устойчивыми и при этом будут свободными от всех перечисленных выше четырех проблем, или, по меньшей мере, от первых трех проблем.

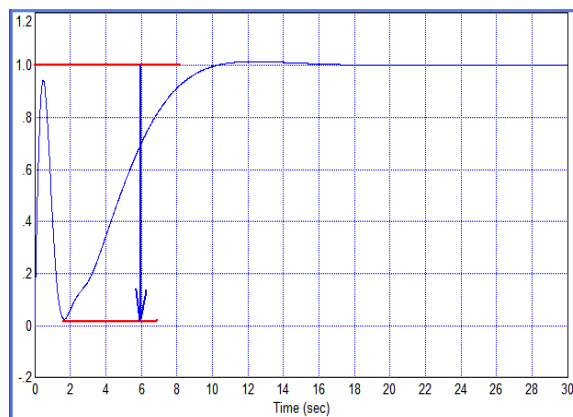


Рис. 4. Обратный ход переходного процесса (здесь почти 100 %)

Также отметим скрытую проблему: отсутствие робастности системы. Неробастной (негрубой) системой называют такую систему, в которой устойчивость достигается только при условии абсолютно точной реализации, по меньшей мере, одного параметра регулятора. Ясно, что абсолютная точность никогда не достижима, поэтому система, не обладающая робастными свойствами, не может использоваться.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объект управления имеет вход и выход, а значит, на его вход может быть подан входной сигнал $U(t)$, а с выхода снят выходной сигнал $Y(t)$. Математическая модель описывает зависимость между этими двумя величинами.

Например, модель объекта может быть задана передаточной функцией в форме рациональной дроби в области преобразований Лапласа [1]:

$$W_1(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{b_0 + b_1s + \dots + b_ms^m}{a_0 + a_1s + \dots + a_ns^n}. \quad (1)$$

Здесь m и n – порядок числителя и знаменателя, s – аргумент преобразования Лапласа. Все сигналы, описываемые как функция времени, обозначаются как функция от аргумента t , а соответствующие им преобразования Лапласа обозначаются как функции от s , что соответствует представлению сигнала в частотной области.

Выходной сигнал объекта $Y(t)$ зависит не только от входного сигнала, но также содержит в качестве добавки результат действия внешнего неизвестного возмущения. Наиболее просто это описать путем добавления к выходному сигналу $X(t)$ результата действия возмущения в виде добавочного сигнала $H(t)$, который также можно называть возмущением. Поскольку успешное подавление возмущения может быть

осуществлено только в системе с обратной связью, в системе должен быть регулятор.

Наиболее распространенная структура такой системы показана на *Рис. 5*.

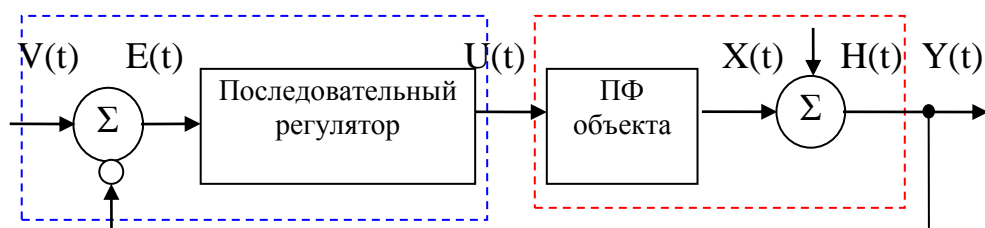


Рис. 5, Традиционная структура управляющей системы с обратной связью (ПФ – передаточная функция)

На *Рис. 1* применены типовые обозначения сигналов: $X(t)$ – выходной сигнал объекта без учета возмущения $H(t)$, $V(t)$ – вектор состояния, $Y(t)$ – выходной сигнал объекта, $E(t)$ – ошибка управления, $U(t)$ – управляющий сигнал. В этой системе имеется последовательный регулятор, а также вычитающее устройство, которое осуществляет вычитание фактической выходной величины объекта $Y(t)$ из ее предписанного значения $V(t)$.

Требуется, чтобы выходной сигнал был равен предписанной величине $V(t)$.

Управляемая часть выходного сигнала объекта равна произведению его входного сигнала на передаточную функцию и обозначается $X(t)$. Регулятор вычисляет управляющий сигнал $U(t)$ на основании разности между предписанием $V(t)$ и выходным сигналом объекта $Y(t)$. Эта разница называется ошибкой управления, обозначается $E(t)$. То есть регулятор должен свести ошибку к нулю.

Регулятор преобразует сигнал ошибки в сигнал управления. Если система устойчива, а коэффициент в контуре достаточно велик, то задача управления автоматически решается с помощью такого способа. Если же система неустойчива, то требуется рассчитать регулятор, который эту устойчивость обеспечит.

Задача состоит в отыскании математической модели регулятора. Трудность решения этой задачи зависит от сложности математической модели объекта. Если объект имеет колебательные свойства, задача управления им достаточно сложна.

Наиболее часто используется модель регулятора, содержащего пропорциональный, интегрирующий и дифференцирующий каналы. Это регулятор называется ПИД. В общем виде его уравнение имеет следующий вид:

$$W_R(s) = \left[K_P + \frac{K_I}{s} + sK_D \right]. \quad (2)$$

Здесь K_P , K_I , K_D – это коэффициенты усиления, которые следует определить. Для отыскания этих коэффициентов можно использовать метод численной оптимизации, например, путем отыскания таких значений этих коэффициентов,

которые сообщают минимальное значение некоторой целевой функции [1–14]. Примером такой целевой функции может служить функция следующего вида:

$$F(T) = \int_0^T |e(t)| \cdot t \, dt. \quad (3)$$

Здесь T – время моделирования переходного процесса.

2. ВЫБОР МОДЕЛИ ОБЪЕКТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Например, существенной проблемой является модель объекта со следующей передаточной функцией:

$$W_1(s) = \frac{4s^2 - s + 1}{s^4 + 32s^3 + 14s^2 - 4s + 50}. \quad (4)$$

В наших модельных исследованиях выяснилось, что основная проблема с этим объектом порождается отрицательным коэффициентом в числителе. Коэффициенты в знаменателе могут быть все положительные, или они могут несколько отличаться, но отрицательный коэффициент при члене второй степени в числителе порождает наиболее сильно склонность в объекте к колебаниям.

Даже получение устойчивого процесса с таким объектом является трудной задачей. Если же ее удастся решить, то в переходном процессе появляются все четыре проблемных свойства: обратное и прямое перерегулирование, значительный обратный ход и большое количество колебаний.

Приоритетной задачей управления объектом вида (4) является обеспечение устойчивости и устранение обратного перерегулирования. Следующей по важности задачей является снижение амплитуды колебаний около равновесного состояния.

Задача обеспечения устойчивости и устранения обратного перерегулирования может решаться несколькими методами, рассматриваемыми ниже.

3. МЕТОД ОБВОДНОГО КАНАЛА

Первый метод состоит в применении обводного канала. Типовая структурная схема такой системы показана на Рис. 6.

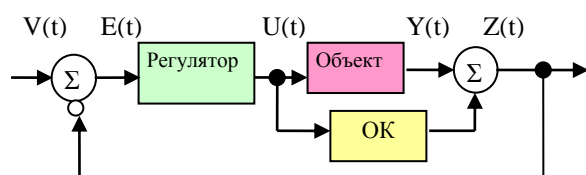


Рис. 6. Структура объекта с обратной связью и с обводным каналом (ОК)

Обводной канал [2] имеет передаточную функцию, которая в низкочастотной области близка к нулю, и поэтому не оказывает влияния на статическую точность системы. В высокочастотной области эта передаточная функция такова, что дополняет передаточную функцию объекта до составной модели, управление которой может быть осуществлено более успешно и эффективно.

Поскольку отрицательный знак члена в числителе является проблемой, то передаточная функция, в которой бы этот член принимал положительное значение, является более предпочтительной. То есть желаемая передаточная функция имеет вид:

$$W_2(s) = \frac{4s^2 + s + 1}{s^4 + 32s^3 + 14s^2 - 4s + 50}. \quad (5)$$

На этом основании путем вычитания из требуемой передаточной функции исходной функции (4) можно получить передаточную функцию обводного канала, которая равна:

$$W_3(s) = \frac{2s + 1}{s^4 + 32s^3 + 14s^2 - 4s + 50}. \quad (6)$$

Недостаток этого метода состоит в недостаточном качестве переходного процесса, что выражается в относительно большом переуправлении, большой амплитуде первых колебаний.

4. КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД

Второй метод решения рассмотренной задачи состоит в использовании компенсационного звена на входе объекта. Структурная схема такой системы показана на Рис. 7.

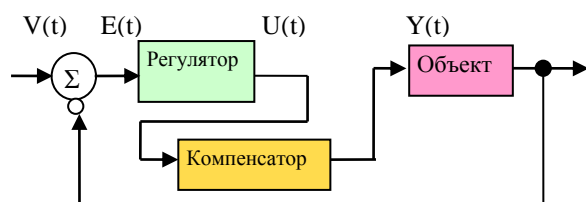


Рис. 7. Структура системы с обратной связью и с компенсатором

Недостаток этого метода состоит в отсутствии робастности, что будет показано далее.

5. МЕТОД ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХСЯ РЕГУЛЯТОРОВ

Третий метод решения рассмотренной задачи состоит в использовании двух регуляторов, один из которых включается на время начала переходного процесса, а другой – на время его окончания. Типовая структурная схема такой системы показана на Рис. 8.

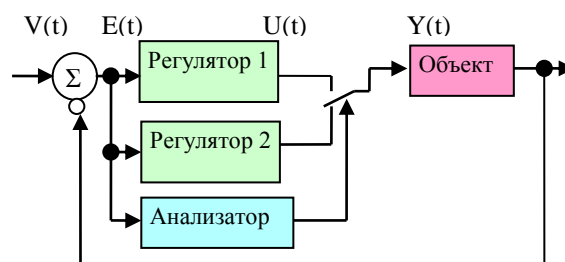


Рис. 8. Структура системы с обратной связью и с переключающимся регулятором

Недостаток этого метода состоит в дополнительном переходном процессе в момент переключения регуляторов. Переключение регуляторов может быть осуществлено плавно, что несколько снижает величину этого переходного процесса. Другой недостаток этого метода состоит в том, что он относительно эффективен лишь при отработке скачка предписания $V(t)$, тогда как основная и самая важная задача системы управления состоит в отработке возмущения $H(t)$.

6. МЕТОД ВНЕШНЕГО КОНТУРА

Четвертый метод состоит в организации внешнего контура управления, как показано на Рис. 9. Можно показать, что этот способ эквивалентен включению фильтра между входом системы и выходом формирователя предписанного значения, как показано на Рис. 10.

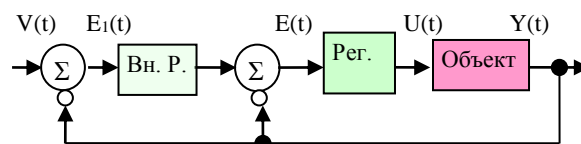


Рис. 9. Структура системы с обратной связью с внешним управляющим контуром

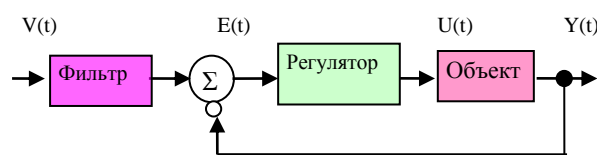


Рис. 10. Структура системы с обратной связью с пред-фильтром

Недостаток этого метода также состоит в том, что он эффективен лишь при обработке скачка предписания, тогда как наиболее важно качественно обработать возмущение.

7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА

Пятый метод может состоять в использовании сигналов из раскрытой модели объекта для управления по вектору состояния объекта. Модель в виде передаточной функции дает при моделировании только один выходной сигнал $X(t)$. Полное состояние объекта не доступно для измерения. Раскрытая модель объекта может предоставить выход полного вектора состояния, то есть всех производных выходного сигнала. Если удастся осуществить стабилизацию всех этих производных, то задача управления объектом будет решена. С этой целью следует для каждой производной сформировать идеальную модель ее изменения, сравнить ее фактическое значение с значением на выходе идеальной модели, и разницу использовать для управления объектом. Эта задача крайне сложна, и ее решение можно осуществлять поэтапно. В данной статье исследуется возможность получения промежуточных сигналов путем создания раскрытой модели объекта. Моделирование позволило установить, что эта возможность зависит от метода интегрирования при вычислении интегралов в раскрытой модели.

8. О РАСКРЫТОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

С учетом того, что передаточная функция (4) равна отношению выходного сигнала $X(s)$ к сигналу управления $U(s)$, можно подставить это отношение в соотношение (4), откуда можно выразить $s^4 X(s)$ как функцию $U(s)$ и членов с $X(s)$, содержащих s в меньших степенях. Деление этого соотношения на s^4 дает уравнение вида:

$$X = \frac{1}{s} \left\{ -2X + \frac{1}{s} \left[-32X + U + \frac{1}{s} (-14X + 4U + \frac{1}{s} (4X - U + \frac{1}{s} (-50X + U))) \right] \right\}. \quad (7)$$

По этому соотношению можно моделировать уравнение объекта. При построении структурной схемы предварительно сигнал $X(s)$ используется как входной сигнал системы наряду с известным сигналом $U(s)$. Строится структура для моделирования суммы во внутренних скобках, результат интегрируется. Полученный результат используется для вычисления внешней суммы, результат также интегрируется и используется для вычисления суммы в последующих внешних скобках, и так далее. Результат вычисления суммы в фигурных скобках также интегрируется, в итоге получается сигнал $X(s)$, который заводится на вход раскрытой модели. Соответствующая структурная схема для моделирования раскрытой модели показана на Рис. 11.

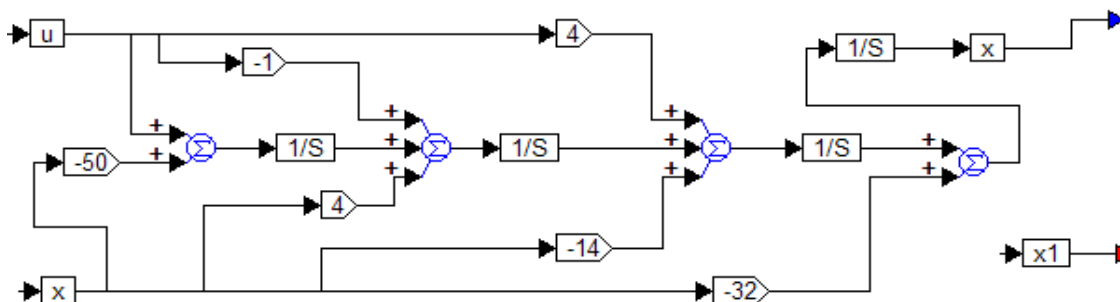


Рис. 11. Структура для моделирования объекта (4) методом многократного интегрирования

Проблема, препятствующая дальнейшему исследованию возможности этого метода, состоит в том, что выходные сигналы такой модели не совпадают с выходными сигналами модели, получаемой путем задания передаточной функции в виде рациональной дроби. Исследования показали, что причина этого состоит в выборе метода интегрирования при математическом моделировании.

9. О ВЫБОРЕ МЕТОДА ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Исследования, направленные на реализацию раскрытой модели, выявило преимущество метода интегрирования *Булири-Стоера* в сравнении с остальными для численной

оптимизации и моделирования замкнутых динамических систем. Этот результат не совпадает с ранее опубликованными результатами для задачи моделирования и оптимизации систем автоматического управления в программе *VisSim*. Так в книге [1] сказано, что наиболее адекватным методом интегрирования является простой метод *Эйлера*. Это утверждение имело свое обоснование. Для этого было осуществлено многократное дифференцирование с последующим многократным интегрированием сигнала, а также многократное интегрирование с последующим многократным дифференцированием. Только при использовании простого метода *Эйлера* n -кратное дифференцирование

(интегрирование) с последующим n -кратным интегрированием (дифференцированием) давало исходный результат. При использовании метода Булири-Стоера указанное требование выполнялось не во всех случаях. Однако, только этот метод дал полное совпадение сигналов на выходе раскрытой модели с сигналами на выходе модели в виде передаточной функции.

Структурная схема для моделирования системы с объектом (4) показана на Рис. 12. В этом случае использован метод с обводным каналом для получения устойчивого переходного процесса без обратного перерегулирования. Получаемые процессы показаны на Рис. 13.

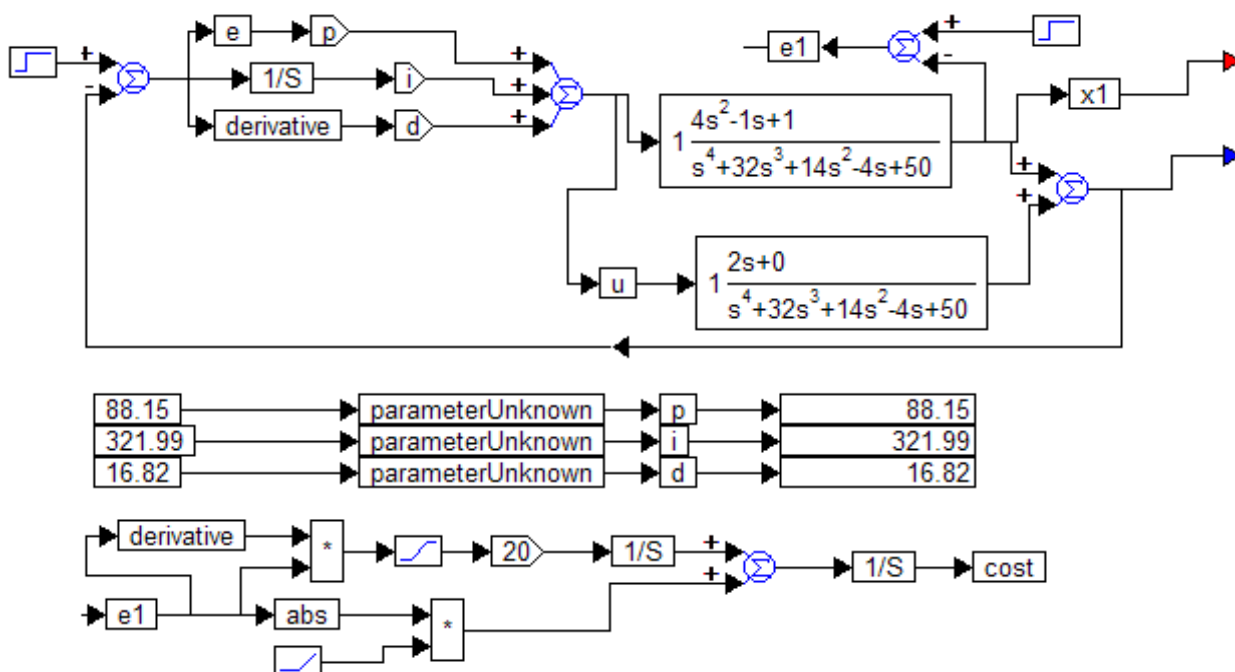


Рис. 12. Структура для моделирования и оптимизации системы с обводным каналом для управления объектом (4), а также результаты оптимизации

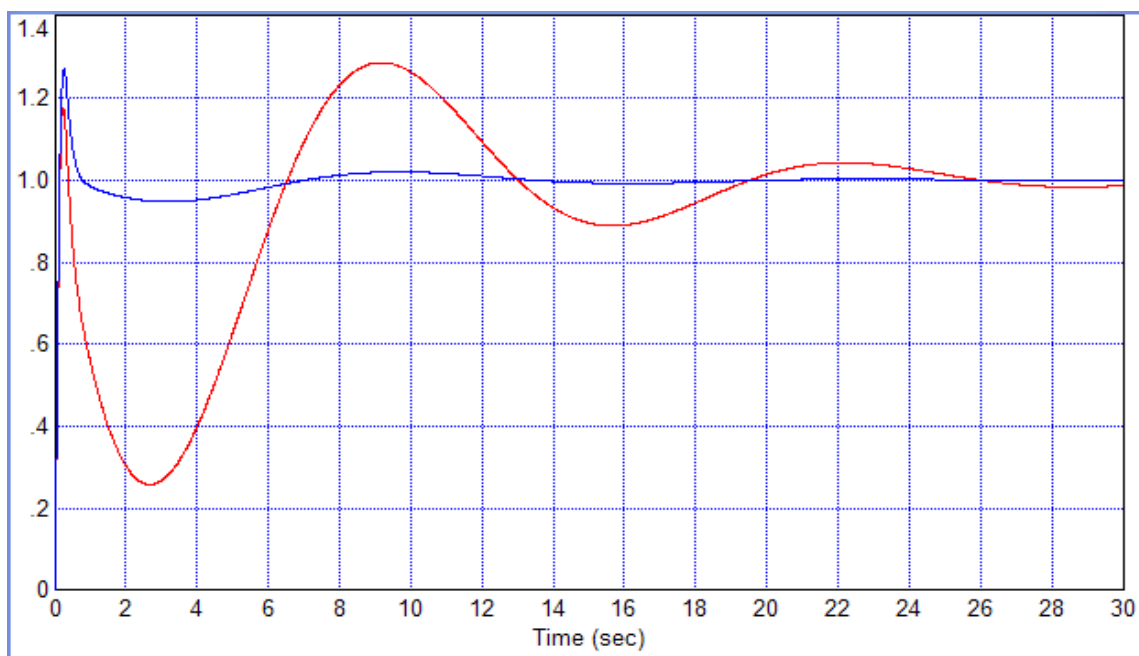


Рис. 13. Переходные процессы, получаемые в структуре по Рис. 12: красная линия – выход объекта, синяя линия – выход суммы сигнала объекта и обводного канала

Из этих графиков видны достоинства и недостатки метода с обводным каналом. Совместно с объектом обводной канал образует

составной объект, управление которым осуществляется успешно. Соответствующий выходной сигнал показан синей линией на

Рис. 13. Но наиболее важен вид выходного сигнала только объекта, без компоненты, вкладываемой обводным каналом. Этот график показан красной линией на Рис. 13. Видно, что, хотя обратное перерегулирование отсутствует, то есть этот сигнал не пересекает нулевой уровень, все же в системе имеются колебания относительно равновесного состояния. Первое и наибольшее отклонение в отрицательном направлении составляет более 70 % (обратный ход), наибольшее отклонение в положительном направлении, по счету второе, составляет менее 30 % (перерегулирование). Такой результат можно считать удовлетворительным, если эти показатели не противоречат техническим требованиям на систему, но он далек от идеального вида. В идеальном процессе

указанные отклонения, как правило, не должны превышать 10 %, если технические требования не требуют еще меньшей величины.

Для использования управления по вектору состояния требуется получение этого вектора состояний, то есть требуется реализация модели по структурной схеме, показанной на Рис. 11. Результат реализации показан на Рис. 10. Красной линией показан переходный процесс на выходе модели объекта в виде рациональной дроби, согласно Рис. 12, синей линией показан процесс на выходе раскрытой модели объекта в соответствии с Рис. 11. Видно, что эти графики лишь приблизительно совпадают на начальном этапе, а затем резко отличаются. При этом использовался простой метод Эйлера для интегрирования сигналов.

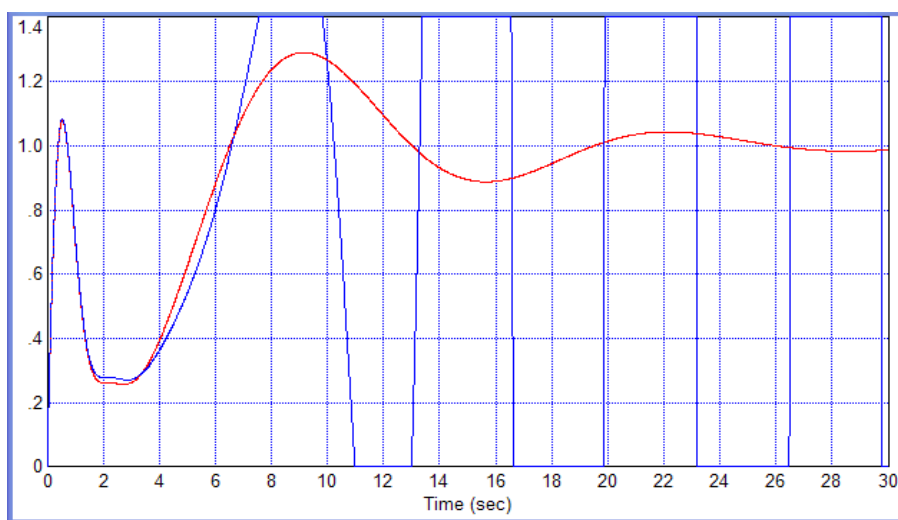


Рис. 14. Переходный процесс на выходе модели по рис. 11 (синяя линия) и процесс в объекте по рис. 12 (красная линия): процессы совпадают только при выборе метода интегрирования “Adaptive Bulirsh-Stoer”

Метод интегрирования выбирается на вкладке «симуляция», как показано на Рис. 15.

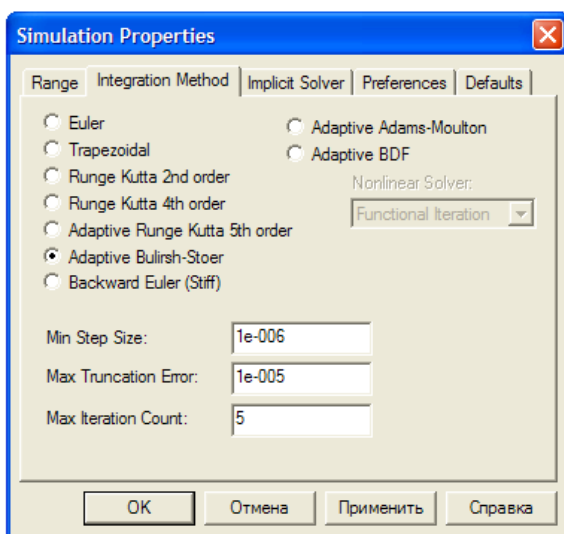


Рис. 15. Диалоговое окно для выбора метода интегрирования

Выяснилось в ходе моделирования, что несовпадения результата моделирования по структуре Рис. 11 с результатом по структуре Рис. 12 имеют место при всех видах интегрирования, кроме адаптивного метода Булирши-Стоера. При использовании этого метода достигается полное соответствие сигналов на выходе обоих видов модели, по Рис. 11 и по Рис. 12. Таким образом, при моделировании по методу Булирши-Стоера обеспечивается полная адекватность двух видов моделей. Это позволяет получить все промежуточные сигналы в модели объекта для использования их в системе управления по вектору состояний.

Отметим, что важность получения полной адекватности двух моделей при цифровом вычислении интегралов и производных определяется тем, что подавляющее большинство современных управляющих систем используют цифровые регуляторы. В цифровых регуляторах все сигналы вычисляются цифровым путем, поэтому выбор метода интегрирования определяет алгоритм, по которому будут

вычисляться интегралы и производные от используемых сигналов в цифровом регуляторе после его программно-аппаратной реализации. Таким образом, использование программы *VisSim* для моделирования системы вместо, например, использования программы *MATLAB*, предпочтительно, поскольку позволяет окончательно отладить алгоритм работы регулятора. В программе *MATLAB* вычисление производных и интегралов осуществляется более строго и более точно, но такое вычисление не может быть реализовано для обработки реальных сигналов, поступающих на регулятор в форме последовательности цифровых отсчетов, следующих один за другим. Поэтому результаты, получаемые в программе *VisSim* более надежны, чем результаты, получаемые в программе *MATLAB*.

10. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ПРИ ИНТЕГРИРОВАНИИ ПО АЛГОРИТМУ БУЛИРШ-СТОЕРА

Из предыдущего раздела видно, что выбор метода интегрирования по алгоритму *Булирш-Стоера* дает новые возможности, поскольку сигналы на выходе раскрытой модели полностью совпадают с сигналами на выходе закрытой модели. Это позволяет предположить, что компенсационный метод может оказаться более результативным при таком методе интегрирования.

На *Рис. 16* показана структурная схема для использования компенсационного метода.

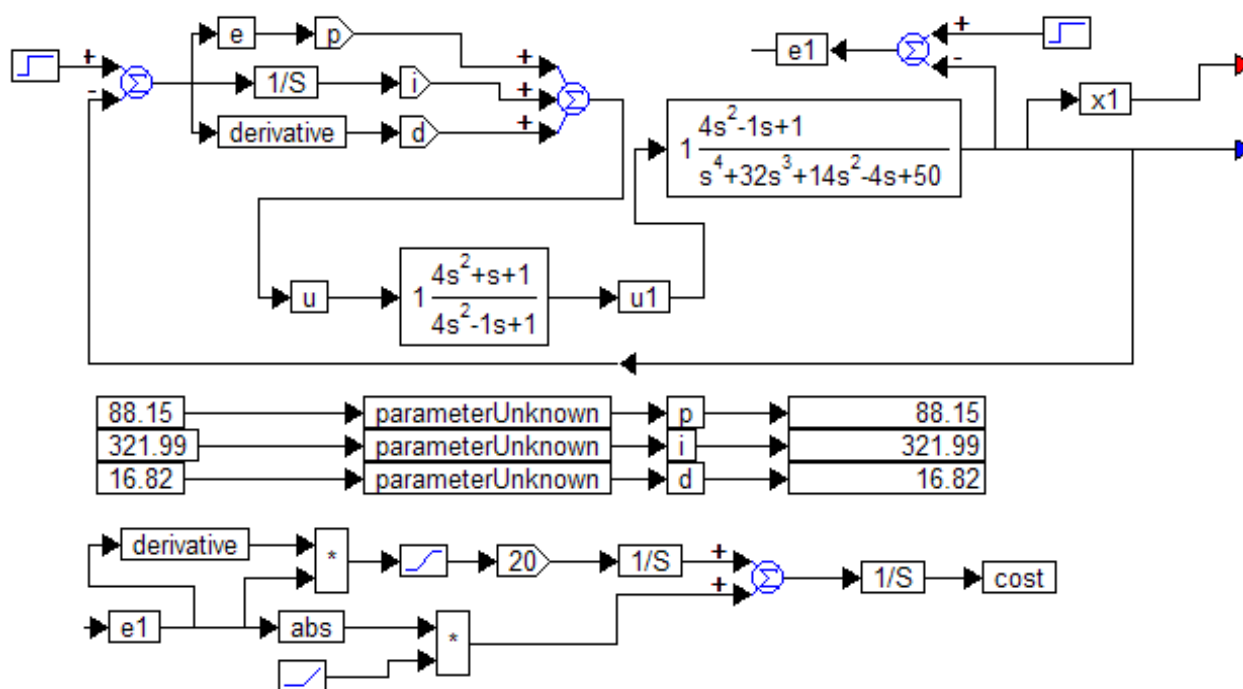


Рис. 16. Структура для моделирования и оптимизации регулятора по методу с использованием компенсационного элемента

При этом настройки регулятора взяты такими, какие получены для системы с обводным каналом, а передаточная функция компенсирующего элемента взята такой, чтобы преобразовать модель объекта в модель составного объекта, включающего обводной канал. То есть в знаменателе этого элемента записан числитель модели объекта, а в его числителе – тот же полином, в котором отрицательный коэффициент изменен на положительный. Результат моделирования показан на *Рис. 17*. Полученная система устойчива, переходный процесс обладает хорошим качеством, которое совпадает с процессом на выходе составного объекта по методу управления с обводным каналом. Первое перерегулирование составляет 30 %, обратный

ход менее 8 %, переходный процесс быстро затухает, по истечении примерно 14 с он практически окончен. Моделирование процесса на достаточно большом интервале времени показало, что устойчивость не нарушается.

Указанный результат можно было бы считать хорошим, однако, как было сказано выше, системы с компенсационным элементом не являются робастными. Получаемый эффект компенсации успешно работает только при полном совпадении знаменателя компенсационного устройства с числителем объекта. Отклонение даже на одну сотую процента вызывает нарушение устойчивости системы, как показано на *Рис. 18*. Если бы процесс анализировался только на интервале до 50 с, можно было бы считать, что система

устойчива. Но по истечении этого времени наблюдается постепенная раскачка выходного сигнала около равновесного состояния, которая

приводит к полной потере устойчивости.

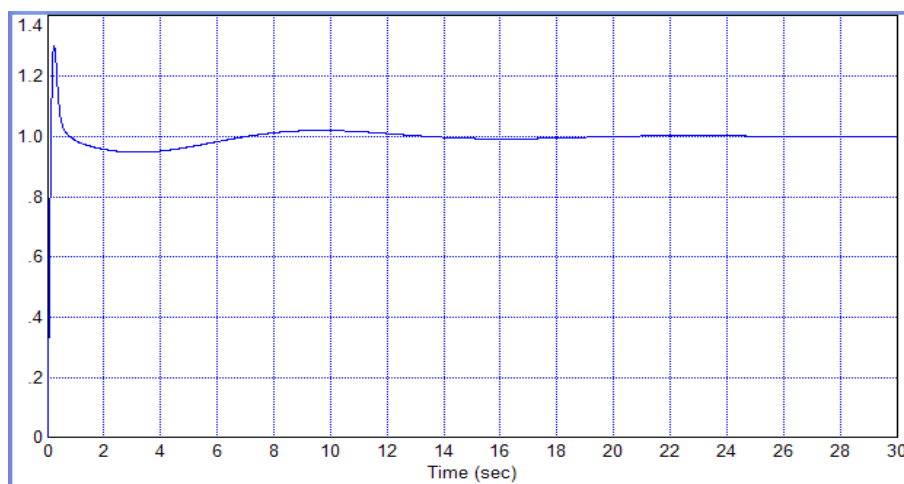


Рис. 17. Переходный процесс, получаемый в структуре по Рис. 16

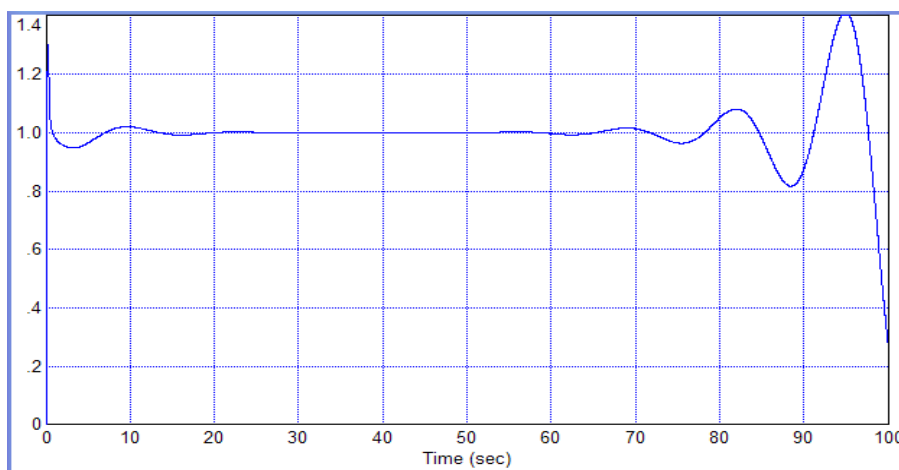


Рис. 18. Переходный процесс, получаемый в структуре по Рис. 16 при нарушении точности одного из коэффициентов знаменателя компенсационного элемента на величину +0,0001

К сожалению, отсутствие робастных свойств для данной структуры фатально. Нельзя указать нижнюю границу погрешности, при которой система оставалась бы устойчивой, такой границы нет. Система неустойчива и при меньшей погрешности реализации компенсационного устройства, хотя это проявляется не столь быстро, а с большей по величине задержкой по времени. Поскольку абсолютного соответствия на практике обеспечить нельзя, такая система не может быть сделана устойчивой ни при каких обстоятельствах. При этом неточность реализации коэффициентов регулятора или числителя компенсационного устройства не нарушает устойчивость, поэтому робастные свойства не выполняются только в отношении знаменателя компенсационного устройства. Но это не снимает проблему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье дана классификация методов управления колебательными объектами, для каждого из четырех методов указаны достоинства и недостатки. Предложено использовать метод пространства состояний, показано, что использованию этого метода препятствует несовпадение выходных сигналов закрытой и открытой моделей. Выявлены причины этого несовпадения, заключающиеся в отличиях результатов интегрирования при использовании разных методов интегрирования в программе численного моделирования *VisSim*. Исследование выявило, что выбор метода интегрирования по адаптивному алгоритму *Булири-Стоера* снимает эту проблему. Дальнейшее управление объектом не должно представлять проблемы, поскольку при доступном векторе состояния система становится полностью управляемой. Дополнительно исследована возможность применения

метода с использованием компенсационного звена при выборе указанного метода интегрирования. Показано, что, хотя в этом случае моделирование дает хороший результат, получаемая система не обладает робастными свойствами применительно к совпадению знаменателя передаточной функции компенсационного звена с числителем передаточной функции объекта. Отсутствие робастных свойств такой системы фатально, то есть такую систему применять нельзя. Однако, такая система может составить основу для применения метода с двумя переключающимися регуляторами, поскольку такой регулятор может быть успешно использован на начальном участке переходного процесса. В этом случае отсутствие робастности не фатально, поскольку небольшие отличия в указанных полиномах не вызывают существенных отличий в начальном участке переходного процесса, а конечный участок переходного процесса в такой системе не используется, так как в этом случае работает другой канал управления (второй регулятор).

На данном этапе развития теории и практики регулятор с обводным каналом позволяет получить наилучшие результаты, но регулятор с управлением по вектору состояний представляется наиболее перспективным, что требует дальнейших исследований в этой области.

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] В.А. Жмудь. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск. Издательство НГТУ. 2012. – 335 р. ISBN 978-5-7782-2162-8
- [2] A.A. Voevoda, V.A. Zhmud, R.Yu. Ishimtsev, V.M. Semibalamut. “The modeling tests of the new PID-regulators structures”. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P. 165–168.
- [3] V.A. Zhmud, O. D. Yadrishnikov, A.V. Poloshchuk, A.N.Zavorin. “Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators”. 2012. Proceedings of 7-th International Forum on Strategic Technology, IFOST-2012.
- [4] V.A. Zhmud, A.V. Liapidevskiy, E.V. Prokhorenko. “The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6”. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. P. 27–32.
- [5] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. “Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function”. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [6] V.A. Zhmud, AV.. Polishchuk, A.A. Voevoda, R.V. Rao. “The Tuning of the PID-Regulator for Automatic Control System of Thermo Energetic Equipment”. Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.
- [7] V.A. Zhmud, A.N. Zavorin. “The method of designing energy-saving controllers for complex objects with partially unknown model”. In the book: Issues of control and modeling in complex systems. Proceedings of the XVI International Conference June 30 - July 3, 2014, Samara. Russia. P. 557-567.
- [8] V.A. Zhmud, A.N. Zavorin. “Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati”. Italian Science Review, 2014, № 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> and <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>
- [9] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. “The providing of the power saving control of one output value with two controlling channels having different effectiveness and cost of the controlling resource”. Proceedings of 23-nd International Scientific and Technical Conference of Transport, Road-Buildong, Agricultural, Hosting & Hauling Military Technics and Technologies “Trans & MOTAUTO ‘15”. 24-27 June, 2015. Varna, Bulgaria. Vol.3. P. 118 – 122. ISSN: 1310-3946. Publisher: Scientific-technical union of mechanical engineering.
- [10] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. “The providing of the power saving control of one output value with two controlling channels having different effectiveness and cost of the controlling resource”. International Journal for Science, Technics and Innovations for Industry. 2015. Issue 9. ISSN 1313-0226. Sofia. Bulgaria. P. 50 – 54. Publisher: Scientific-technical union of mechanical engineering. URL: www.mech-ing.com/journal
- [11] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, O.D. Zavorin. “Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of numerical optimization method”. 2014. 12-th International Conference on Actual Propblems of Electronic Instruments Engineering (APEIE) 34006. Proceedings. Novosibirsk. 2014. Vol.1. P. 739 – 744.
- [12] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, A.S. Vostrikov. “Feedback Systems with Pseudo Local Loops”. Testing and Measurement: Techniques and Applications: Proceedings of the TMTA-2015. 16-17 January 2015, Phuket Island, Thailand. Taylor & Francis Group. London. ISBN: 978-1-138-02812-1-8. P. 411 – 416. Typeset by diactriTech, Chennai, India, Published: CRC Press / Balkema. P.O. Box 11320, 2301 EH Leiden, The Netherland. www.crcpress.com, Printed and bond in the UK and US, ISBN 987-1-138-02812-8, 978-1-315-68493-2.
- [13] В.А. Жмудь, Л.В. Димитров. Адаптивные системы на основе конкурентных критериев оптимума. Автоматика и программная инженерия. 2015. № 4 (14). С. 19–25.
- [14] В.А. Жмудь. Управление объектом с линейно нарастающим запаздыванием. Автоматика и программная инженерия. 2015. № 4 (14). С. 26–34.



Вадим А. Жмудь, заведующий кафедрой Автоматики в Новосибирском государственном техническом университете, автор более чем 300 научных работ, включая более 20 патентов, 12 учебных пособий.

E-mail: zhmud@corp.nstu.ru



Владимир М. Семибаламут директор сибирского филиала Геофизической Службы СО РАН, кандидат физико-математических наук, автор более 100 научных статей и более 10 патентов. Область интересов включает автоматизацию научных экспериментов, лазерную физику, геофизику, программное обеспечение, оптимизацию, системы сбора и обработки данных.

E-mail: vladim28@yandex.ru.



Любомир В. Димитров, декан машиностроительного факультета Технического университета Софии (София, Болгария), 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

Structure and Methods of Control of Oscillating Objects

Vadim Zhmud, Vladimir Semibalamut, Lubomir Dimitrov

Abstract: The relevantness of the task of control of oscillatory object is beyond doubt. Yet it is still has not been solved successfully, except for individual examples. In particular, the task of control of the object, having in its transfer function numerator or denominator negative coefficients of the polynomial, is of great interest. This task is even more complicated if there is a negative coefficient both in the numerator and in the denominator. This task can be solved by various methods. It is worth of noting among them the use of the bypass channel, the use of the equalizer, the use of a switching regulator, the use of additional external control loop and the use of the filter on the reference input. The paper dealt with these methods. It demonstrates their advantages and disadvantages with mathematical modeling (simulation). It is shown that the choice of integration method for modeling of integrators and derivative devices can significantly affect to the result of simulation and optimization. This should be considered when choosing the algorithm of the digital controller, because without the choice of integrating method in the control algorithm it is not complete and it can not act. If the calculation would be done without taking into account the this choose, then the results of its use will not match, at least due to the mismatch of the methods for calculating of the integrals and derivatives of the used and signals. It is shown that it is not possible to choose the best method of integration for all problems, because the two most

appropriate methods, namely, a simple Euler method and adaptive method Bulirsh-Stoyer, each has both advantages and disadvantages, which are discussed in the paper.

Key words: Control, locked loops, regulators, design of controlling systems digital control, feedback, optimization

REFERENCES

- [1] V.A. Zhmud. "Simulation, research and optimization of locked system of automatic control". Monograph. Novosibirsk. Publishing house of NSTU. 2012. – 335 p.
- [2] A.A. Voevoda, V.A. Zhmud, R.Yu. Ishimtsev, V.M. Semibalamut. "The modeling tests of the new PID-regulators structures". Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P. 165–168.
- [3] V.A. Zhmud, O. D. Yadrishnikov, A.V. Poloshchuk, A.N.Zavorin. "Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators". 2012. Proceedings of 7-th International Forum on Strategic Technology, IFOST-2012.
- [4] V.A. Zhmud, A.V. Liapidevskiy, E.V. Prokhorenko. "The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6". 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. P. 27–32.
- [5] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. "Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function". Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [6] V.A. Zhmud, AV.. Polishchuk, A.A. Voevoda, R.V. Rao. "The Tuning of the PID-Regulator for Automatic Control System of Thermo Energetic Equipment". Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.
- [7] V.A. Zhmud, A.N. Zavorin. "The method of designing energy-saving controllers for complex objects with partially unknown model". In the book: Issues of control and modeling in complex systems. Proceedings of the XVI International Conference June 30 - July 3, 2014, Samara. Russia. P. 557-567.
- [8] V.A. Zhmud, A.N. Zavorin. "Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati". Italian Science Review, 2014, № 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> and <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>
- [9] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. "The providing of the power saving control of one output value with two controlling channels having different effectiveness and cost of the controlling resource". Proceedings of 23-nd International Scientific and Technical Conference of Transport, Road-Buildong, Agricultural, Hosting & Hauling Military Technics and Technologies "Trans & MOTAUTO '15". 24-27 June, 2015. Varna, Bulgaria. Vol.3. P. 118 – 122. ISSN:1310 – 3946. Publisher: Scientific-technical union of mechanical engineering.
- [10] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. "The providing of the power saving control of one output value with two controlling channels having different effectiveness and cost of the controlling resource". International Journal for Science, Technics and Innovations for Industry. 2015. Issue 9. ISSN 1313 – 0226. Sofia. Bulgaria. P. 50 – 54. Publisher: Scientific-technical union of

- mechanical engineering. URL: www.mech-ing.com/journal
- [11] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, O.D. Zavorin. "Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of numerical optimization method". 2014. 12-th International Conference on Actual Problems of Electronic Instruments Engineering (APEIE) 34006. Proceedings. Novosibirsk. 2014. Vol.1. P. 739 – 744.
- [12] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, A.S. Vostrikov. "Feedback Systems with Pseudo Local Loops". Testing and Measurement: Techniques and Applications: Proceedings of the TMTA-2015. 16-17 January 2015, Phuket Island, Thailand. Taylor & Francis Group. London. ISBN: 978-1-138-02812-1-8. P. 411 – 416. Typeset by diatriTech, Chennai, India, Published: CRC Press / Balkema. P.O. Box 11320, 2301 EH Leiden, The Netherland. www.crcpress.com, Printed and bond in the UK and US, ISBN 987-1-138-02812-8, 978-1-315-68493-2.
- [13] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov. "Adaptive feedback systems on the base of Concurrent Criteria of Optimum". Automatics & Software Engineering. 2015. № 4 (14). P. 19–25. ISSN 2312-4997.
- [14] V.A. Zhmud. "Control of Object with Linearly Increasing Delay". Automatics & Software Engineering. 2015. № 4 (14). P. 26–34. ISSN 2312-4997.