

Тестирование регуляторов по методу локализации на их эффективность

В.А. Жмудь^{1,2,3}, А.В. Лятидевский¹

¹АО «Новосибирский институт программных систем», Россия

²Институт лазерной физики СО РАН, Россия

³Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизической службы РАН

Аннотация. Научная школа НГТУ в области управления замкнутыми динамическими системами широко использует и рекламирует метод проектирования регуляторов, основанный на принципе локализации. Этот метод также в некоторых случаях называется методом разделения движений, хотя существуют и другие методы, не связанные с ним ни коим образом, направленные на решение тех же самых задач, носящие сходное название. Регулярно публикуются новые статьи, подтверждающие эффективность методов, основанных на принципе локализации. Данная публикация применяет метод численного моделирования для детального исследования преимуществ, возможных недостатков и ограничения для применения этого метода.

Ключевые слова: автоматика, ПИД-регулятор, ПИ²Д-регулятор, ПИД²-регулятор, ПИ²Д², ПЛ-регулятор

ВВЕДЕНИЕ

Публикации, раскрывающие метод локализации, широко используемый в научной школе по управлению, существующей в НГТУ, основаны на тезисах, изложенных даже в Википедии, вследствие чего их можно считать широко известными [1]. Регуляторы, спроектированные на основе этого принципа, получили название ПЛ-регуляторы. Данная статья ссылается как на первоисточники, где излагается этот метод, на статьи [3], [4], [5]. Пожалуй, самая известная и основополагающая публикация для этого научного направления – это одна из первых (наряду с [2]) наиболее известных из широко цитируемых и наиболее цитируемая из широко известных публикаций на эту тему автора этого принципа [6], остальные публикации, по-видимому, все-таки базируются на изложенных в ней принципах. В профиле основателя этой научной школы можно найти достаточное количество публикаций на эту тему, в том числе и в открытом доступе³. Последователи основателя этой школы, причисляющие себя к ней, продолжают публикации на тему применения этого метода [7], [8], [9], [10], [11]. Имеются и статьи с критикой применения этого метода, например, [12]. Однако, критика метода, в частности, на примере статьи [11]. Поскольку в статье [12], на наш взгляд, приведены некоторые структурные преобразования, оправдывающие эту критику, но не приведены достаточно наглядные примеры численного моделирования. Статья [12], подготовленная нашим аспирантом и не без нашей консультации, все же не получила достаточного модельного подтверждения, поэтому, вероятно, эта критика видится недостаточно ясной, а по этой причине она не

несет необходимого созидательного начала. По указанным причинам представляется актуальным осуществить более детальный разбор указанного метода и базового принципа, лежащего в его основе. Тем не менее, публикацию [12] мы можем рекомендовать как предварительную публикацию на эту тему, развитие которой можно осуществить более наглядно с использованием метода численного моделирования. Таким образом, данная статья развивает и продолжает предположения и утверждения, сформулированные в публикации [12], которые состоят в том, что для весьма многих случаев указанный метод проектирования регуляторов не является настолько эффективным и универсальным, как кажется из публикаций представителей этой научной школы, хотя на определенном этапе, по-видимому, этот метод повлиял на развитие теории автоматического управления, ведь в Википедию попадают далеко не все методы проектирования регуляторов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В целом проблематику синтеза ПИД-регуляторов и чрезвычайно краткий, не самый качественный, но все-таки какой ни на есть обзор далеко не всех известных методов решения этой задачи можно найти в той же самой Википедии [13]. Вместо введения мы рекомендуем ознакомиться с содержанием публикации [13], затем с содержанием статьи [12]. Этот материал полностью предоставляет сведения об актуальности проблемы, о предположении о том, что рассматриваемый метод является универсальным и наиболее эффективным, а также публикация [12] излагает все основания для сомнений в этом тезисе на основании проделанных структурных преобразований,

³ https://www.elibrary.ru/author_items.asp?authorid=74501

которые сводят многоконтурную систему к одноконтурной.

Мы же попросту обратимся к проблеме, которая поставлена в публикации [11]. В этой статье рассматривается и решается задача управления динамическим объектом, математическая модель которого имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}. \quad (1)$$

Данный объект – это объект второго порядка. Традиционный способ управления таким объектом – это применение ПИД-регулятора, то есть регулятора, который содержит пропорциональный, интегрирующий и дифференцирующие тракты. Вся задача проектирования ПИД-регулятора в этом случае сводилась бы к отысканию коэффициентов этих трех трактов, при которых замкнутая динамическая система была бы устойчивой, и по возможности желательно, чтобы она обладала достаточным быстродействием и приемлемым качеством. Под качеством понимается отсутствие перерегулирования, колебаний и других нежелательных особенностей переходного процесса [13].

Статья [11] предлагает достаточно сложную структуру регулятора, более сложную, чем традиционный ПИД-регулятор. Правомерен вопрос о том, насколько это целесообразно, и насколько это эффективно.

Постановку задачи мы проигнорируем, поскольку статья содержит единственный пример применения обсуждаемого в ней метода, вот этот пример мы и рассмотрим.

2. АНАЛИЗ

Авторы пишут: «Рассмотрим объект, модуль которого представлена следующей передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{1}{p^2 + 2 \cdot p + 1},$$

где $a_{2ном} = 2$, $a_{1ном} = 1$. Требования к качеству процессов в системе: $t_{III} \leq 3с$, $\sigma \leq 10\%$, $\Delta = 0\%$ » [11]. Далее сказано: «Рассмотрим работоспособность системы с ПИД- и ПИ²Д-регуляторами для данного объекта. В соответствии с заданными требованиями к качеству процессов в системе выберем следующие корни $\lambda_1 = -2$, $\lambda_2 = -2,5$, $\lambda_3 = -3$ и сформируем желаемое уравнение:

$$C_{ж}(p) = p^3 + 7,5p^2 + 18,5p + 15 \gg [11].$$

Довольно трудно понять терминологию «желаемое уравнение». Эта терминология весьма неряшлива. Уравнение системы или объекта традиционно связывает входную и выходную величину. Здесь же просто представлен полином от величины p , которая понимается как символ операции дифференцирования, или в некоторых случаях его можно отождествить с аргументом преобразования Лапласа, который чаще обозначается буквой s . Полином сам по себе не является уравнением. Если полином приравнять к нулю, получим уравнение, но оно не будет связывать входную и выходную величину, поскольку в уравнении этих величин нет.

Но мы смогли догадаться, о чем идёт речь, предложенный полином описывает левую часть характеристического уравнения, которое должно иметь следующий вид:

$$s^3 + 7,5s^2 + 18,5s + 15 = 0. \quad (1)$$

Здесь и далее мы будем пользоваться в качестве аргумента именно аргументом функции Лапласа s . В этом случае система должна формировать такой же отклик на входные воздействия, как фильтр первого порядка, а знаменателе которого стоит указанный полином. Для того, чтобы система обладала нулевой ошибкой, свободный член в знаменателе передаточной функции должен совпадать с числителем, то есть передаточная функция, эквивалентная желаемой замкнутой системе, должна иметь следующий вид:

$$W_L(s) = \frac{15}{s^3 + 7,5s^2 + 18,5s + 15}. \quad (2)$$

На *Рис. 1* показан результат моделирования переходных процессов в ответ на единичный ступенчатый скачок исходного объекта и так называемой желаемой системы, имеющего передаточную функцию вида (2).

Далее в статье предлагается ещё один дополнительный внешний контур с интегратором, и показан итоговый переходный процесс. В статье предложена следующая структура регулятора, которая показана на *Рис. 2*.

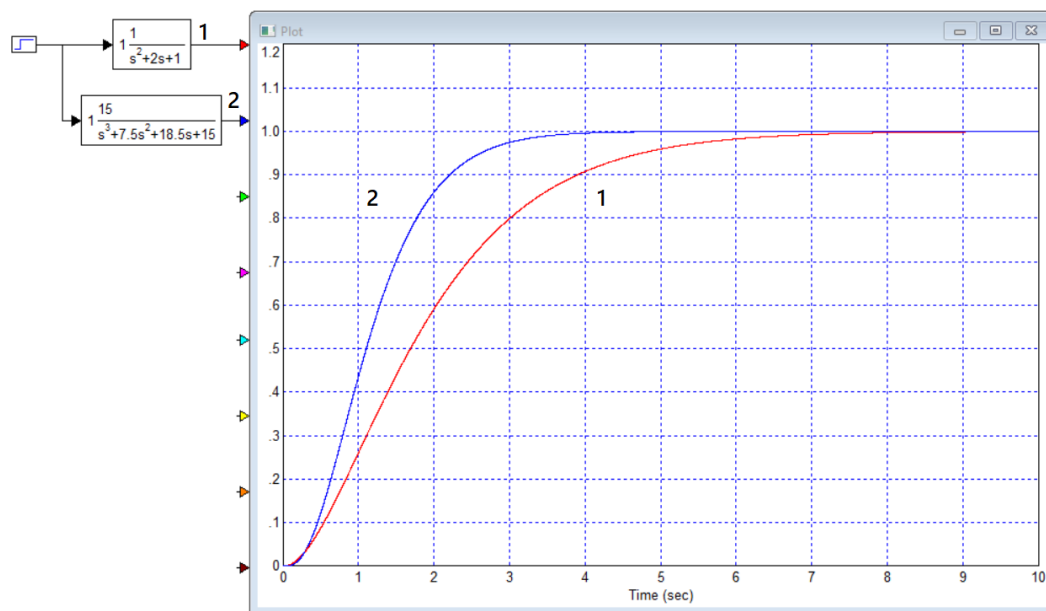


Рис. 1. Результат моделирования переходных процессов в ответ на единичный ступенчатый скачок исходного объекта и так называемой желаемой системы (линия 1), имеющего передаточную функцию вида (линия 2)

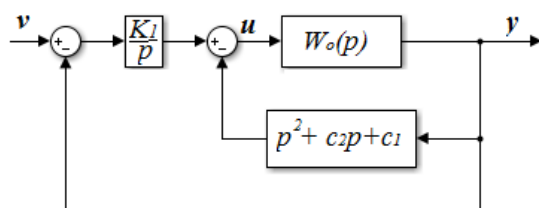


Рис. 2. Структурная схема системы с «ПИ²Д-регулятором» из статьи [11]

В статье не указан коэффициент усиления во внешнем контуре, поэтому проверить корректность моделирования достаточно затруднительно. Также в статье приводятся два переходных процесса, один из которых – промежуточный, который назван процессом с ПИ-регулятором, а другой – окончательный который назван «процессом с ПИ²Д-регулятором». Эти процессы показаны на Рис. 3.

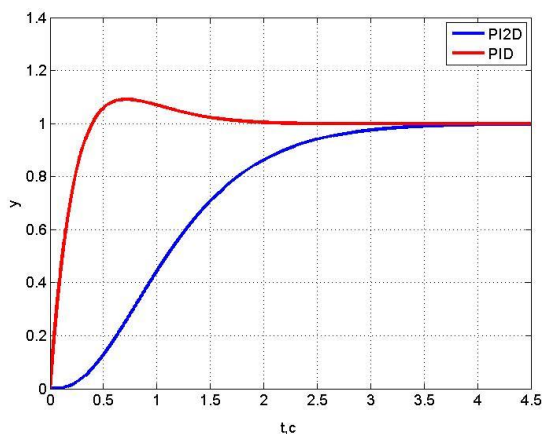


Рис. 3. Переходные характеристики систем с ПИД- и «ПИ²Д-регуляторами», согласно статье [11]

Как видим, длительность переходного процесса в предлагаемой системе составляет около 3,5 с. Отметим, что нам не удалось понять, какие конкретно коэффициенты и в какой конкретно структуре регулятора использовались для получения системы по структуре Рис. 2 или какой-либо иной структуре, о которой, предположительно ведётся речь в статье [11]. Не найдена ни полная модель объекта и регулятора, ни структурная схема, которая бы была полностью достаточной и понятной для моделирования.

Нам не удалось создать работоспособную структуру в соответствии с предлагаемой методикой методом достраивания неизвестных компонент на основе здравого смысла или какой-либо теории.

Действительно, по логике изложения статьи можно предположить, по меньшей мере, две структуры, согласно описанию статьи, и совершенно не понятно, какой структуре авторы отдали предпочтение, и по какой структуре они осуществляли моделирование. Обе эти структуры видятся нам необоснованными, в программе для моделирования обе они неработоспособны, то есть обещанный результат ни с одной из них получить невозможно.

Речь идет, во-первых, о структуре, в которой в качестве обратной связи использовался бы в чистом виде ПИД²-регулятор, который в статье ошибочно называется «ПИ²Д-регулятором», уравнение которого приведено в статье. В таком регуляторе должно быть четыре слагаемых. В статье сказано: «В работе предлагается рассматривать модифицированный ПИ²Д-

регулятор, со следующей передаточной функцией:

$$W_{\text{ПИД}}(p) = K_{\text{П}} + \frac{K_{\text{И}}}{p} + K_{\text{Д1}}p + K_{\text{Д2}}p^2.$$

Значения коэффициентов для этого регулятора в статье не найдено, структурной схемы с таким регулятором в статье не найдено. И теория регулятора, и попытка моделирования указанного объекта с этим регулятором показывают без каких-либо сомнений, что моделирование системы с этим объектом и с этим регулятором при ненулевом коэффициенте $K_{\text{Д2}}$ невозможно, система неработоспособна. Дело в том, что в этом случае мы получаем глобальный контур, где в области высоких частот нет затухания логарифмической амплитудно-частотной характеристики, то есть такая система не реализуема физически, устойчивость её по этой причине исследовать невозможно, смоделировать её в реальном программном обеспечении, работающим по шагам, невозможно, моделирование её в программе, которая не использует реального дифференцирования и интегрирования бессмысленно. Поэтому система с таким регулятором работать в реальности не может. Поэтому данное утверждение приходится считать фейком.

Во-вторых, речь может идти о структуре регулятора по схеме, которая представлена на *Рис. 2*, этот рисунок повторяет соответствующий рисунок в статье [11]. В этом случае по тем же самым причинам мы получаем внутренний контур, в котором порядок числителя совпадает с порядком знаменателя, по этой причине с тем же самым обоснованием, что и в предыдущем абзаце, мы можем утверждать, что моделирование или реализация такой системы невозможна, и в этом случае описание такой системы также является фейком.

В-третьих, можно предположить, что в структуре по *Рис. 2* вместо передаточной функции в виде полинома второго порядка $s^2 + c_2s + c_1$ применяется передаточная функция в виде рациональной дроби, в числителе которой стоит указанный полином, а в знаменателе стоит полином, который стоит в фильтре, который авторами ошибочно называется «дифференцирующим фильтром». Речь идёт об этом фильтре:

$$W_f(p) = \frac{1}{\mu^2 s^2 + 2dsp + 1}. \quad (3)$$

Мы можем сделать такое предположение на основании следующей фразы в статье: «В данной работе предлагается с этой целью применить дифференцирующий фильтр, аналогичный тому, что давно используется в системах, основанных на методе локализации... Его передаточная функция имеет следующий вид:

$$W_f(p) = \frac{1}{\mu^2 p^2 + 2d\mu p + 1} \gg [11].$$

Безусловно, данный фильтр никак не дифференцирующий, он интегрирующий, но если в этом фильтре в числителе ввести указанный в обратной связи полином, тогда такой фильтр можно с некоторой оговоркой назвать «дифференцирующим». В этом случае можно попытаться в структуре по *Рис. 2* вместо полинома второго порядка поставить следующий фильтр:

$$W_f(p) = \frac{s^2 + c_2s + c_1}{\mu^2 s^2 + 2dsp + 1}. \quad (4)$$

Такую структуру смоделировать можно, но контур с предложенным в статье объектом и с таким регулятором в обратной связи оказывается устойчивым с очень специфическими значениями коэффициентов, он неустойчив при значениях коэффициентов, которые указаны в статье. Тем более, следует учесть, что в статье для малого параметра предложено значение $\mu = 0.0001$. Поэтому и такая структура регулятора, вероятнее всего, не применялась, поэтому и такой вариант является фейком.

Также трудно понять, какой все-таки набор коэффициентов применялся, поскольку мы в статье [11] находим два варианта реально сообщаемых наборов коэффициентов.

В одном месте сказано: «В соответствии с соотношениями (8) рассчитаны коэффициенты ПИД-регулятора: $K_{\text{П}} = 17,5$, $K_{\text{И}} = 15$, $K_{\text{Д}} = 5,5$ ». Поскольку структура ПИД-регулятора в статье не приведена, остаётся лишь предположить, что регулятор включается по стандартной структуре. Если наше предположение справедливо, тогда мы можем смоделировать систему с указанными коэффициентами и получить переходный процесс, который совпадает с процессом, показанным в статье (см. *Рис. 3* выше).

В отношении результата с ПИД-регулятором мы ничего не можем возразить, кроме сомнения в полезности описанной методики. На основании простых правил эмпирического метода настройки регулятора мы легко заключили, что для снижения перерегулирования желательно увеличить коэффициент дифференцирующего тракта, но это привело к одновременному небольшому уменьшению выходного сигнала на интервале от 1 с до 4 с, для компенсации этого эффекта мы немного увеличили коэффициент пропорционального тракта, вследствие чего получили следующие коэффициенты ПИД-регулятора: $K_{\text{П}} = 30$, $K_{\text{И}} = 15$, $K_{\text{Д}} = 15$. Полученный переходный процесс показан на *Рис. 5*. Не надо быть большим специалистом по теории автоматического управления, чтобы увидеть, что процесс на *Рис. 5* обладает всеми преимуществами перед процессом на *Рис. 4*. Действительно, этот процесс заканчивается

приблизительно через 0,25 с от начала скачка, перерегулирование отсутствует полностью, тогда как в процессе по *Рис. 4* его длительность в 8 раз больше, присутствует перерегулирование около 10%. В этом случае мы вправе задать вопрос, что за метод, насколько он хорош, если на порядок лучший результат мы смогли получить в три приема? Также имеет смысл сравнить этот процесс с другим процессом, показанным на *Рис. 3*, который также взят из статьи [11], и он соответствует «желаемому

уравнению», о чем сказано выше. Длительность пресловутого желаемого процесса составляет 3,5 с, что в 14 раз больше, чем в процессе на *Рис. 5*, перерегулирование отсутствует в обоих процессах. Получается, что предлагаемый более сложный регулятор позволяет получить систему в 14 раз хуже. Этот факт не украшает анализ полезности метода, а предлагаемые в статье [11] результаты в этом случае видятся совершенно неинтересными.

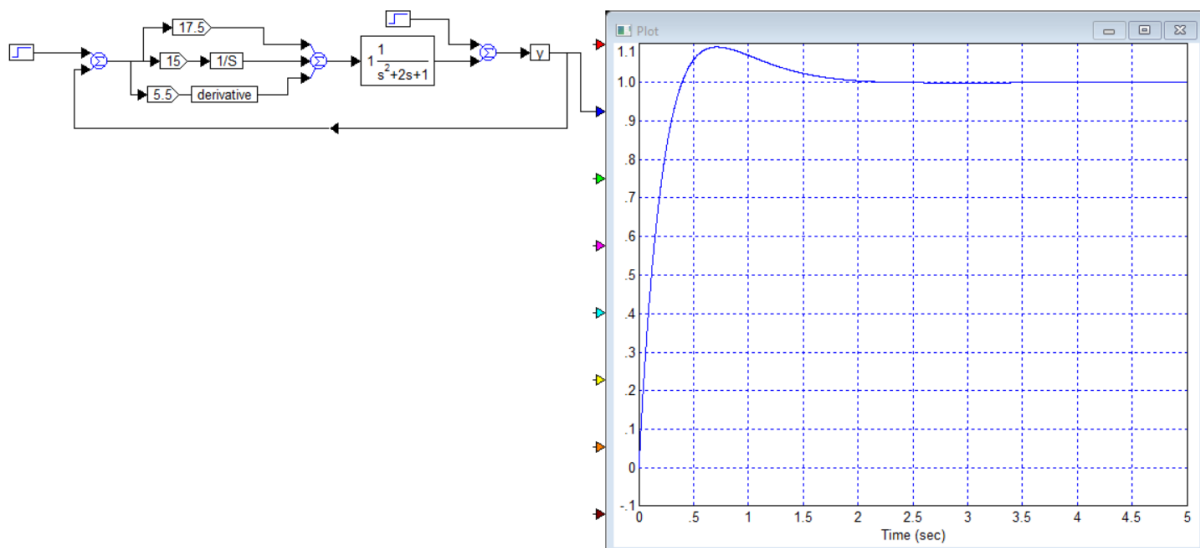


Рис. 4. Результат моделирования предложенного объекта с ПИД-регулятором, описанным в статье [11], подтверждающим приведенный процесс на *Рис. 3*

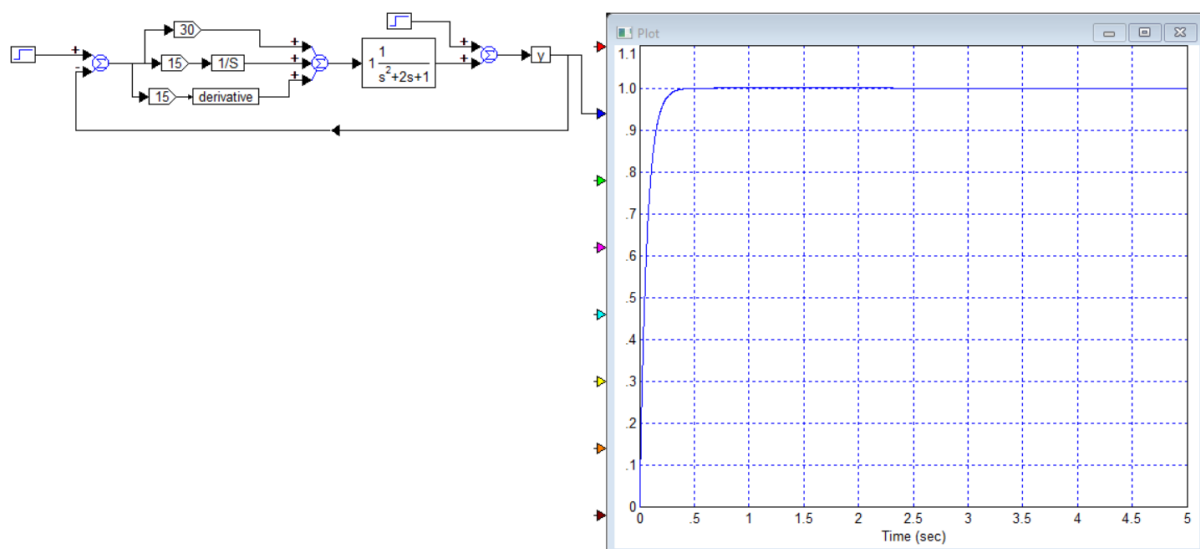


Рис. 5. Результат моделирования предложенного объекта с ПИД-регулятором, полученным в три шага эмпирическим методом настройки

Уж если исследовать целесообразность структуры, в которой регулятор включен в обратную связь, а в прямой связи находится пропорциональный регулятор, тогда для устойчивости такой структуры требуется, чтобы используемый регулятор был ПИД-регулятор,

либо ПД-регулятор, двукратного дифференцирования не требуется. Мы осуществили моделирование такой системы, результат показан на *Рис. 6*. Видно, что легко получается переходный процесс с длительностью переходного процесса, равной 0,2 с. Это в 17,5

раз лучше, чем в предлагаемой системе с пресловутым «ПИ²Д-регулятором».

В отношении целесообразности охвата полученной системы дополнительной внешней петлей с интегратором в прямой ветви и с единичной отрицательной обратной связью, как рекомендовано в статье [11], мы также провели соответствующее исследование. Полученная структура с оптимизированным коэффициентом усилителя при интеграторе показана на Рис. 7, там же показаны два вида переходных процессов – ошибка в ответ на ступенчатый скачок задания, а также ошибка в ответ на отрицательный единичный скачок возмущения. Во-первых, видно, что эти отклики по своему виду далеко не совпадают. Это подтверждает наш теоретический вывод, что в таких структурах следует отдельно исследовать отклики на задание и отклики на возмущение. Во-вторых, полученный отклик имеет приблизительно в три раза большую длительность, а также в этом

отклике возникает перерегулирование от 15% до 25%. Это достаточно наглядно показывает, что внешний контур с интегратором в прямой ветви неэффективен. Действительно, и на основании теории можно было бы заранее предположить, что если замышляется двухконтурная система, тогда целесообразно было бы внутренний контур стремиться сделать по возможности близким к звену первого порядка, пусть даже и не с высоким быстродействием, а внешний контур далее делать с ПИД-регулятором. Статья же предлагает с точностью до наоборот: внутренний контур задается таким, чтобы переходный процесс в нем соответствовал системе второго порядка, а внешний контур делается только с И-регулятором. Обоснования для такого подхода не найдено, практика с моделированием доказывает, что в таком случае внешний контур не улучшает, а только лишь ухудшает свойства полученной системы.

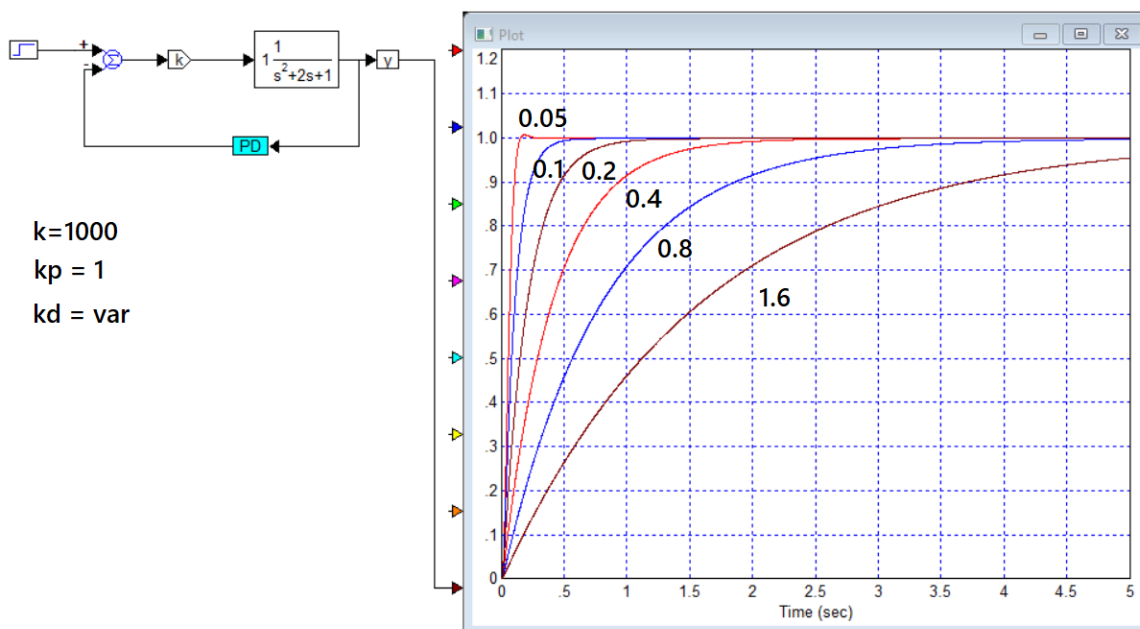


Рис. 6. Результат моделирования предложенного объекта с ПД-регулятором в обратной связи и пропорциональным регулятором в прямой ветви: семейство переходных процессов в зависимости от коэффициента дифференцирующего тракта

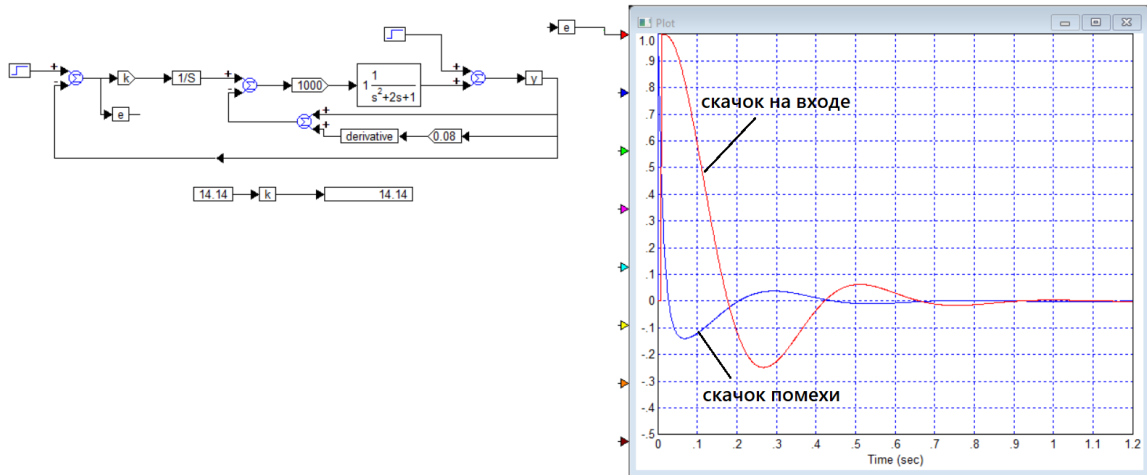


Рис. 7. Результат моделирования предложенного объекта с предложенной двухконтурной системой, а именно: с ПД-регулятором в обратной связи и пропорциональным регулятором в прямой ветви, а также с охватывающей эту субструктуру глобальным контуром с интегратором в прямой ветви и с единичной отрицательной обратной связью: отклики выхода ошибки в ответ на единичный ступенчатый скачок на входе или на отрицательный скачок возмущения

приблизительно 0.007 с, перерегулирование практически отсутствует. Отклики ошибки в ответ на единичный скачок на входе системы, и в ответ на отрицательный единичный скачок возмущения полностью совпадают, по результатам моделирования графики сливаются, общий для этих процессов график показан на Рис. 9. Длительность переходного процесса составляет

приблизительно 0.007 с, перерегулирование практически отсутствует. Отклики ошибки в ответ на единичный скачок на входе системы, и в ответ на отрицательный единичный скачок возмущения полностью совпадают, по результатам моделирования графики сливаются, общий для этих процессов график показан на Рис. 9.

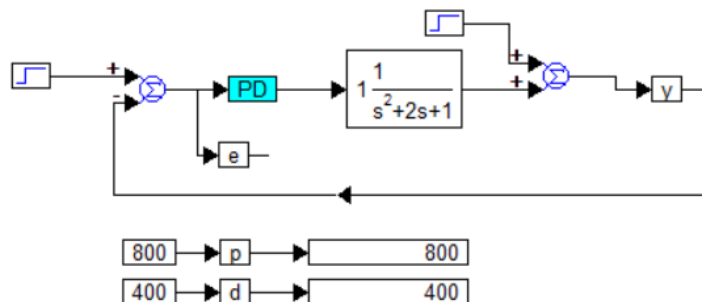


Рис. 8. Альтернативная система: ПД-регулятор с коэффициентами, соответственно, $k_P = 800$, $k_D = 400$

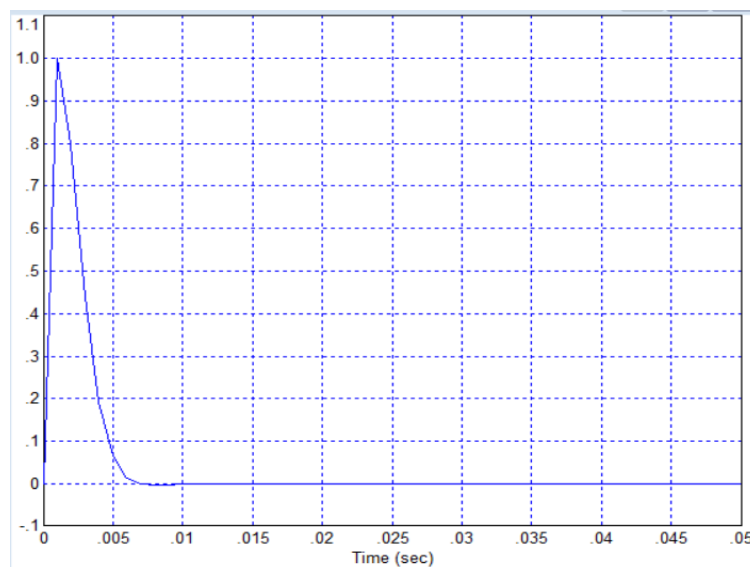


Рис. 9. Отклик ошибки в системе по Рис. 8 при подаче единичного ступенчатого скачка на вход задания, который полностью совпадает с откликом при подаче отрицательного единичного ступенчатого скачка в виде помехи: длительность переходного процесса менее 0.01 с

Рассмотренные результаты позволяют сделать вывод, что публикация [11] не убедила в эффективности предлагаемых в этой статье методик. Мы не распространяем этот вывод на все случаи применения метода локализации. Возможно, что описанные в этой статье методы и результаты не вполне соответствуют базовым принципам методов, мы не берёмся решать этот вопрос. Поскольку статья написана представителем указанной школы НГТУ, возможно, авторы статьи смогут дать объяснения, если их заинтересуют методы и выводы нашей статьи. Опубликование ответов на эту критику, по-видимому, помогло бы найти истину в аргументированной дискуссии, подтвержденной результатами моделирования. Мы бы хотели видеть результаты моделирования в таком виде, когда все используемые модели были бы достаточно ясно представлены, чтобы это моделирование можно было бы воспроизвести самостоятельно любым заинтересованным читателям, с применением любого адекватного программного обеспечения. Мы в этом случае отдаем предпочтение программе *VisSim* по той простой причине, что эта программа не позволяет моделировать такие объекты и структуры, которые не могут быть физически реализованы, например, в случае, когда порядок числителя передаточной функции выше порядка знаменателя (за исключением дифференцирующего усилителя, для которого данная программа делает исключение), все причины этого достаточно детально раскрыты в наших публикациях [14–20], поэтому мы не будем повторять их.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ

В учебном пособии для студентов мы уже разъясняли студентам, какие задачи из области теории автоматического управления целесообразно решать, а какие задачи решать попросту нецелесообразно. Задача, решаемая в статье [11], относится к нецелесообразным для решения задачам. Конечно, взгляды одного профессора другой профессор может игнорировать, но это – не лучшее в науке действие. Предпочтительней было бы обсудить на семинаре разногласия в вопросах актуальнейших для данного научного направления, в котором работают коллеги в рамках одной и той же научной школы, в рамках одного и того же подразделения учебного заведения высшего образования (университета). Проще всего игнорировать эти разногласия и делать вид, что альтернативной точки зрения не существует. Но наше мнение изложено в учебной литературе с приведением достаточных обоснований для него.

В частности, задачу проектирования ПИД-регулятора для объекта второго порядка мы причисляем к задаче, которую нецелесообразно решать. Дело в том, что эта задача не имеет оптимального решения. Это в данном случае не означает, что задачу решить трудно, это, наоборот, означает, что задачу решить достаточно просто, но решение обладает следующим свойством: никакое решение не является наилучшим, какое бы хорошее решение этой задачи не было предложено, всегда можно указать другое решение, которое будет ещё лучше. Причина такого свойства этой задачи, как и многих других задач в этой области, которые мы называем некорректно поставленными задачами, состоит в том, что модель излишне идеализирована, она не может соответствовать никакому реальному объекту, и поэтому её решение нецелесообразно.

Приведем простую аналогию.

Допустим, от нас требуется отыскать единственный набор по возможности как можно больших по величине (в сумме) чисел x и y , отвечающих следующему условию:

$$\begin{aligned}x + y &> 120, \\x - y &< 40.\end{aligned}$$

Хотя не всякое решение удовлетворяет этому условию, но решений для этой задачи имеется бесконечное множество. Например, в результате каких-либо операций или по каким-то соображениям мы решили выбрать следующее решение: $x = 100$, $y = 30$. Нетрудно видеть, что оба требования выполняются. Но имеется ещё оговорка: результаты решения должны быть как можно больше.

Мы можем просто удвоить полученные решения, тогда получим $x = 200$, $y = 60$. Эти новые решения являются большими значениями, и они также удовлетворяют поставленному условию. Мы могли бы вместо этого просто добавлять к каждому из полученных решений любую положительную величину, решение также будет соответствовать условиям, а результат также будет больше, чем предыдущее решение. Какое бы мы решение не нашли, всегда можно указать другое решение, которое также соответствует этим ограничивающим неравенствам, и которое при этом больше, чем любое это решение, и данное утверждение справедливо для любого наперед заданного решения. Поэтому если у нас имеется желание найти самое лучшее решение, то есть решение, которое является самым большим, мы никогда не сможем поставить точку в нашем поиске, мы будем двигаться к все большим и большим значениям. Подобную задачу мы относим к классу задач, которые не могут быть окончательно решены методом численной оптимизации. Любое решение мы можем

отыскать в том числе и этим методом, если дополнительно введем ограничение, но наилучшее, то есть оптимальное решение в рамках сформулированных трех требований мы найти не сможем. Именно поэтому мы называем задачу *некорректной для оптимизации* – НДО.

Если бы в условии задачи не требовалось найти самое большое решение, а требовалось бы найти любое решение, которое удовлетворяет заданным неравенствам, тогда после отыскания любого решения мы поставили бы точку. Если бы в условиях задачи было бы какое-то ограничение, которое заставляло бы нас остановиться на каком-то значении, то оптимизация имела бы смысл. Например, если бы имелось условие, что произведение искомым величин не превышает какое-то положительное значение. Такая задача уже стала бы *корректной для оптимизации* – КДО.

Для полноты классификации добавим, что может существовать и неразрешимая задача, например, если она сформулирована как необходимость отыскания переменных, отвечающих двум соотношениям:

$$\begin{aligned} x + y &> 120, \\ 2x + 2y &< 140. \end{aligned}$$

Очевидно, что такая задача не имеет решений, поскольку невозможно отыскать число, которое было бы больше, чем 120, но будучи удвоенным, оказалось бы меньше, чем 140, любое число, которое, будучи удвоенным, меньше, чем 140, должно быть меньше семидесяти. Такой класс задач разумно назвать *неразрешимыми задачами*.

Мы подчеркиваем, что задача отыскания какого угодно ПИД-регулятора для объекта второго порядка в целом разрешима. Задача отыскания ПИД-регулятора с какими-то наперед заданными свойствами также в целом разрешима. Но задача отыскания оптимального ПИД-регулятора для линейного объекта второго порядка является *некорректной для оптимизации*, НДО. Если при постановке задачи заказчики хотят получить какой угодно регулятор, они могут удовлетвориться каким угодно решением. Но как правило наука занимается отысканием либо самого лучшего решения, либо, по меньшей мере, приемлемого решения при условии, что решение задачи не является слишком уж простым. Вряд ли науке следует заниматься решением примитивных задач, решение которых настолько очевидно, что, как говорится, «лежит на поверхности». И уж во всяком случае сомнительно, что результат решения такой задачи имеет смысл публиковать, а методика получения такого результата заслуживает внимания и обсуждения в научной публикации. Самое важное в этом случае состоит в том, что решение *некорректных для оптимизации задач* не имеет никакого практического смысла по той причине, что

нельзя достоверно утверждать, что это решение может быть успешно применено.

Для простоты сначала рассмотрим объект, имеющий модель идеального интегратора:

$$W_{01}(p) = \frac{1}{s}. \quad (4)$$

Предположим, что последовательно с объектом используется пропорциональный регулятор, и вся эта последовательность охвачена единичной отрицательной обратной связью. Структура для моделирования такой системы показана на *Рис. 10*. Мы утверждаем, что данный пример является примером НДО, некорректной для оптимизации задачи. При любом коэффициенте усиления данная система остаётся устойчивой, при этом чем больше будет коэффициент усиления, тем лучше будет результат.

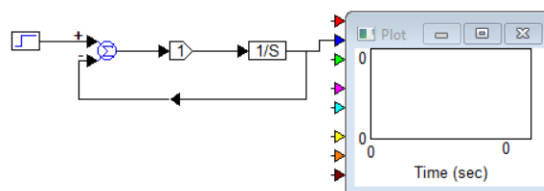


Рис. 10. Структура для моделирования объекта в виде идеального интегратора с пропорциональным регулятором

Например, можно рассмотреть семейство переходных процессов, являющихся откликом на единичное ступенчатое входное воздействие. При этом если применить коэффициент усиления, равный единице, переходный процесс будет иметь экспоненциальный вид и длиться приблизительно 6 с. Если этот коэффициент удвоить, получив $k = 2$, длительность переходного процесса снизится до 3 с, если ещё раз удвоить этот коэффициент, получив $k = 4$, длительность переходного процесса ещё в два раза сократится до значения 1,5 с, как показано на *Рис. 11*.

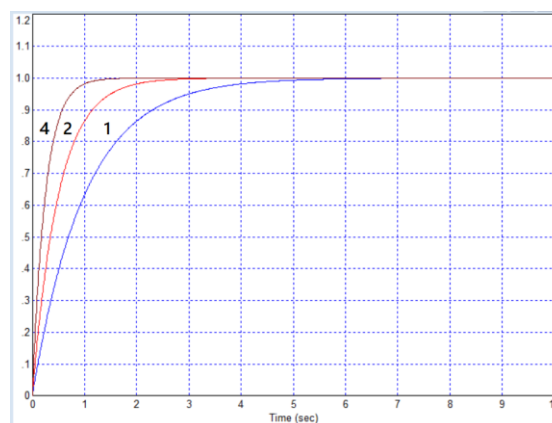


Рис. 11. Переходные процессы в структуре по *Рис. 10* при различных значениях коэффициента (значения указаны на графике рядом с соответствующими линиями)

Увеличение коэффициента можно продолжать до бесконечности, при этом длительность переходного процесса будет всё меньше и меньше, как, например, на *Рис. 12* и *Рис. 13*.

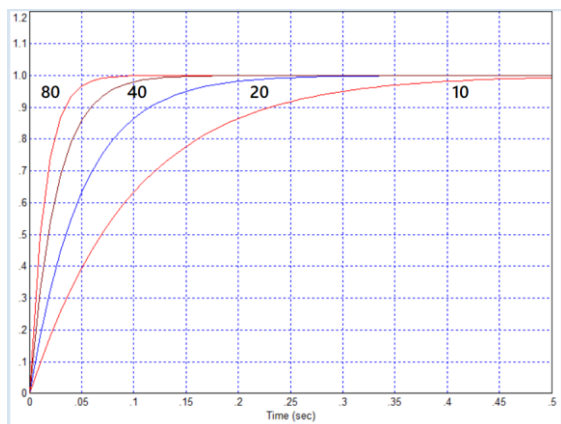


Рис. 12. Переходные процессы в структуре по *Рис. 10* при различных значениях коэффициента (продолжение)

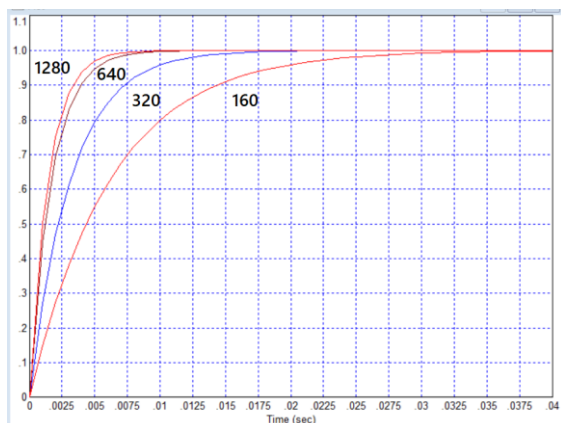


Рис. 13. Переходные процессы в структуре по *Рис. 10* при различных значениях коэффициента (продолжение)

Этот процесс увеличения коэффициента усиления можно продолжать до бесконечности. Можно поставить задачу обеспечения сколь угодно высокого быстродействия, с идеальной моделью объекта (4) недостижимого значения для быстродействия не существует. При моделировании, например, в программе *VisSim* мы лишь должны привести в соответствие шаг дискретизации. Разумеется, если, например, шаг дискретизации равен 0,001 с, то мы не сможем при этих условиях моделирования обеспечить длительность переходного процесса за время, меньшее чем некоторое относительно большое количество шагов. Например, мы не сможем с таким шагом получить переходный процесс длительностью 0,002 с, но если достаточно уменьшить этот шаг, то мы сможем получить и такой процесс и сколь угодно более быстрый.

Этим свойством обладает только идеальная математическая модель и система с этой идеальной математической моделью, но этим свойством никогда не обладает и не может обладать никакой реальный объект и никакая реальная система.

В идеальной модели мы выбираем не просто наиболее простую форму передаточной функции, соответствующую с достаточной степенью точности фактическому переходному процессу, но при выборе подобного математического описания мы при этом выбираем и наиболее «счастливое сочетание», наиболее «благоприятный вид» передаточной функции, а именно: убедившись, что в некоторой ограниченной области частот передаточная функция затухает обратно пропорционально значению частоты, а сдвиг фаз постоянен и равен 90° , мы полагаем, что такой вид передаточной функции сохраняется до бесконечных частот. В предположении такого замечательного вида передаточной функции объекта мы получаем замечательные его свойства. Мы предполагаем в этом случае, что на сколь угодно больших частотах объект имеет отклик на входной сигнал. Этого на практике не бывает никогда, это невозможно. Двигаясь по логарифмической оси частот в сторону всё больших и больших значений, мы с каждой новой декадой попадаем в область, где частоты в 10 раз выше, чем в предыдущей декаде. Даже если мы начинаем с области 0,001 Гц, через 3 декады мы попадаем в область 1 Гц, еще через 6 декад мы будем уже в области 1 МГц, что соответствует сверхвысоким частотам (СВЧ), ещё через 3 декады мы уже достигнем области 1 ГГц, то есть сверх-сверх высокие частоты (ССВЧ), ещё через 3 декады мы уже попадаем в область оптических частот, электрические сигналы этой частоты не распространяются по проводникам электрического тока в принципе. Ни один объект не может иметь отклика на этих частотах, если это не светоизлучающий элемент, но и светоизлучающий элемент не имеет отклика на тех частотах, которые соответствуют рентгеновскому излучению и так далее.

Кроме того, в любом физическом объекте обязательно присутствует запаздывание: как минимум, это время, требуемое на прохождение электрического сигнала по всей цепи. Допустим, что длина этого тракта между входом и выходом составляет всего лишь 1 см. Даже электрический сигнал не может распространяться быстрее, чем скорость света в вакууме, то есть за одну наносекунду свет пролетает только 30 см, на преодоление расстояния в 1 см свету потребуется 33 пс. Эти тридцать три пикосекунды на каждый сантиметр составляют минимальное запаздывание сигнала для всех случаев. Поэтому ни один объект нельзя называть объектом, в котором запаздывание отсутствует в принципе, так как оно имеется во

всех объектах. Если нет никаких других причин для того, чтобы частотная характеристика затухала в этой области частот, то указанных причин достаточно: во-первых, имеется запаздывание 33 мс/см , во-вторых, на частотах, когда электрический сигнал превращается в оптический, отклика не может существовать ни в каком объекте с электрическим выходом. Но имеются, как правило, и другие, более существенные причины для того, чтобы частотная характеристика уменьшалась гораздо быстрее, чем по зависимости (4), и намного раньше, чем при достижении ССВЧ-частот. Именно по этой причине имеется существенное различие между поведением идеальной модели объекта с ростом коэффициента усиления и поведением реального объекта в тех же условиях. Идеальный объект с идеальной моделью (4) ведёт себя следующим образом: никакое увеличение коэффициента усиления, сколь бы большим оно ни было, никогда не может вызвать нарушения устойчивости системы с таким объектом по структуре, показанной на *Рис. 10*. С реальным объектом всегда имеется другое непреложное правило: сколь бы идеальной не казалась математическая модель объекта, ни один реальный объект не может сохранять свою устойчивость в структуре по *Рис. 10* при сколь угодно большом коэффициенте усиления: всегда найдётся такой коэффициент усиления, при котором такая система станет неустойчивой, следовательно, неработоспособной.

Рассмотренная проблема возникает в том случае, если порядок полинома, описывающего петлю системы в разомкнутом виде, это первый порядок.

Если этот порядок – второй, тогда система при бесконечном увеличении коэффициента усиления может быть выведена на границу устойчивости, но все-таки она не становится неустойчивой. Такое идеальное свойство идеализированного объекта также не соответствует никакому реальному объекту и никакой реальной системе.

Если модель разомкнутого контура описывается третьим порядком или более высоким порядком, либо если в этом модели содержится звено запаздывания, тогда коэффициент усиления в таком контуре нельзя повышать бесконечно, не нарушая устойчивость. Даже с объектом с идеальной моделью третьего порядка или с идеальной моделью любого порядка, содержащей звено запаздывания увеличение коэффициента усиления не может до бесконечности улучшать свойства замкнутой системы, рано или поздно наступит такая ситуация, когда в системе начнет возрастать перерегулирование, а далее система просто станет неустойчивой. Это свойство обязательно присутствует в любой реальной системе с реальным объектом.

По этой причине модель третьего порядка или модель с запаздыванием может в составе системы автоматического управления утратить устойчивость по тем же самым причинам, по которым устойчивость утрачивает реальный объект. В этом случае мы можем говорить, что принятая для проектирования регулятора модель, адекватна реальному объекту и адекватна поставленной задаче проектирования регулятора.

В тех случаях, когда система с идеализированной моделью объекта с данным видом регулятора остается устойчивой, тогда как система с реальным объектом и таким же регулятором утрачивает устойчивость, следует признать, что такая модель неадекватна задаче, поскольку она не описывает тех условий, при которых устойчивость в системе с реальным объектом утрачивается.

Таким образом, мы можем заключить, что модель объекта в виде идеального интегратора вида (4) является неадекватной формой описания объекта даже в том случае, если предполагается проектировать пропорциональный регулятор.

По этим же самым причинам модель объекта в виде звена первого порядка является неадекватной моделью во всех случаях постановки задачи проектирования регулятора. В частности, на *Рис. 14* показана модель системы с объектом первого порядка, а на *Рис. 15* показаны переходные процессы в этой системе при различных коэффициентах усиления.

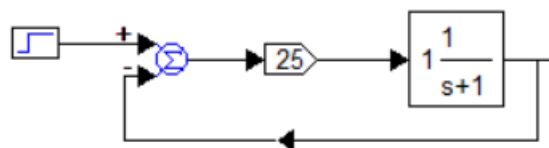


Рис. 14. Структура для моделирования объекта в виде идеального звена первого порядка с пропорциональным регулятором

Но если модель объекта задана уравнением второго порядка, а используемый регулятор – пропорциональный, тогда при бесконечном увеличении коэффициента в системе установятся незатухающие колебания. С ростом коэффициента эти колебания будут увеличивать свою частоту.

Но хотя это и не соответствует никакому реальному объекту, это уже не является столь существенной проблемой, поскольку при оптимизации системы незатухающие колебания являются нежелательным явлением. Следовательно, ещё до того, как в модели системы появятся эти колебания, поисковая процедура не будет увеличивать далее коэффициент усиления, она остановится на некотором оптимальном значении, при котором свойства системы будут наилучшими. Оптимальность можно понять в таком смысле, что если коэффициент уменьшать, тогда процесс

будет становиться более медленным, то есть ухудшаться; если же коэффициент увеличивать, то будет возрастать перерегулирование, то есть система также будет ухудшаться. Следовательно, выбранный коэффициент будет сообщать системе наилучшие свойства.

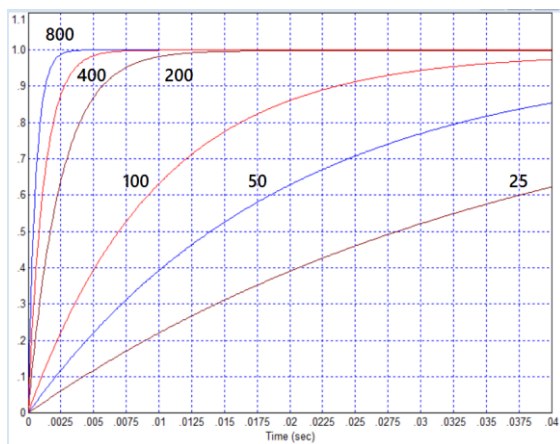


Рис. 15. Переходные процессы в структуре по Рис. 14 при различных значениях коэффициента (значения указаны на графике рядом с соответствующими линиями)

Для понимания дальнейших рассуждений следует ввести понятие «асимптотический порядок» передаточной функции, описывающей модель или в целом весь разомкнутый контур системы. Если в исследуемой передаточной функции положить $s \rightarrow \infty$, тогда всеми членами в любом полиноме можно пренебречь в сравнении с членом старшего порядка в этом полиноме. Оставшаяся передаточная функция будет описывать поведение частотной характеристики в области самых больших частот. Это означает, что если в системе сделать достаточно большой коэффициент усиления, тогда эта характеристика будет приблизительно совпадать с характеристикой объекта, описываемого только коэффициентом и множителем s в некоторой положительной или отрицательной степени. Степень этого множителя можем обозначить r , и эту степень мы будем называть асимптотической степенью передаточной функции. Если передаточная функция имеет вид дроби, в числителе которой стоит полином степени m , а в знаменателе – полином степени n , тогда асимптотическая степень такой передаточной функции равна $r = m - n$. Так асимптотическая степень модели первого порядка равна минус единица. Асимптотическая степень дифференцирующего устройства равна плюс единица. Соответственно, асимптотическая степень ПИД-регулятора также равна плюс единица. Действительно, рассмотрим передаточную функцию ПИД-регулятора:

$$W_{\text{ПИД}}(s) = K_{\text{П}} + \frac{K_{\text{И}}}{s} + K_{\text{Д}}s =$$

$$= \frac{K_{\text{П}}s + K_{\text{И}} + K_{\text{Д}}s^2}{s}. \quad (5)$$

Если оставить в полиноме в числителе только старший член, после чего сократить s в числителе и знаменателе, то получим:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} W_{\text{ПИД}}(s) = \lim_{s \rightarrow \infty} (K_{\text{Д}}s). \quad (6)$$

Поскольку при последовательном соединении блоков передаточные функции перемножаются, следовательно, асимптотический порядок произведения отдельных передаточных функций является суммой асимптотических порядков сомножителей.

В соответствии с этим асимптотический порядок ПИД²-регулятора, называемого в статье [11] «ПИ²В-регулятором», равен двум:

$$W_{\text{ПИД}^2}(s) = K_{\text{П}} + \frac{K_{\text{И}}}{s} + K_{\text{Д}1}s + K_{\text{Д}2}sp^2. \quad (7)$$

В пределе в (7) остаётся только старший член.

Итак, на основании рассмотренных утверждений, не требующих дополнительных доказательств, система, содержащая петлю, составленную из последовательного соединения ПИД-регулятора и объекта второго порядка, является системой с асимптотическим порядком разомкнутого контура, равным минус единице. Оптимизация такой системы бессмысленна, найденная настройка регулятора будет зависеть только от того, на каком конкретном значении разработчик решит остановиться. Один разработчик может найти коэффициенты, при которых, например, быстродействие системы будет составлять 1 с, другой разработчик остановится на быстродействии в 10 или в 100 или в 1000 раз большим, всё это совершенно случайно, результат будет определяться случайным фактором или случайным выбором метода проектирования. Для практического объекта результат, полученный случайно, может оказаться либо недостаточно хорош, либо слишком хорош. В первом случае получим результат, который ещё можно улучшить. Во втором случае получим результат, который невозможно получить на практике. В обоих случаях результат не достоин рассмотрения.

Если же для объекта второго порядка применять ПИД²-регулятор, называемый в статье [11] ошибочно «ПИ²Д-регулятором», тогда асимптотический порядок полученной системы будет нулевым. Система с нулевым порядком не может быть смоделирована в программном обеспечении, осуществляющем моделирование по шагам. А при моделировании такой системы с помощью точных математических вычислений может оказаться, что такая система устойчива и имеет бесконечную полосу частот. Это равносильно тому, чтобы исследовать на устойчивость контур, содержащий только дифференцирующее звено с коэффициентом. Эта задача не

соответствует никакой практической задаче, это также задача, относящаяся к классу НДО – *некорректная для оптимизации* задача.

В случаях, когда мы получаем НДО-задачу для традиционного регулятора, например, для ПИД-регулятора, нам следует уточнить модель объекта, добавив в неё те элементы, которые ответственны за затухание с более высокой степенью, или за увеличение запаздывания более чем на 180° . Если для модели объекта, которая может оказаться корректной для традиционного регулятора, например, ПИД-регулятора, мы пытаемся спроектировать регулятор более высокого порядка, т.е. с большим значением r , тогда мы задачу КДО превращаем в задачу НДО, чем обесцениваем наши исследования. Попытка отыскания ПИД-регулятора для объекта второго порядка – это уже бессмысленная задача, НДО-задача. Но если в эту задачу вводится регулятор с ещё большим значением асимптотического порядка, это усугубляет проблему. Любое полученное решение будет бессмысленным даже при использовании ПИД-регулятора, а при использовании регулятора более высокого порядка – тем более. Таким образом, публикация [11] при той постановке, которая в ней имеется (управление объектом второго порядка без запаздывания) и при выбранной методике её решения (проектирование ПИД-регулятора или регулятора с более высокой степенью дифференцирования), не могла быть не фейковой, она в любом случае содержит результаты, которые не могут быть применены на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нам бы хотелось протестировать метод, используя достоверные результаты, опубликованные с указанием всех данных для того, чтобы мы могли безошибочно смоделировать системы. Для этого желательно было бы в статьях найти полностью структуры или модели объектов со всеми численными значениями всех коэффициентов, а также все структуры или модели регуляторов, без каких-либо недомолвок, намеков. Нам не хотелось бы заниматься угадыванием идей, которые не освещены достаточно полно для того, чтобы понять, как ими воспользоваться, и, по меньшей мере, чтобы проверить их работоспособность хотя бы на том единственном примере, который, как правило, имеется в публикации (не более того). В случае, когда даже с единственным примером объекта статья не раскрывает в достаточной степени структуру регулятора, всякая попытка проверки этих результатов наталкивается на неразрешимые проблемы. В некоторых случаях нам приходится усомниться в том, что статья сообщает фактически полученные результаты, поскольку в предлагаемых структурах, как мы сумели их понять и восстановить, в некоторых случаях вид процесса не совпадает настолько,

что такие контуры оказываются попросту неустойчивыми, либо не могут быть смоделированы вследствие системной ошибки (структура является не реализуемой физически). Таким образом, данная статья не даёт данных, на основании которых мы могли бы согласиться с эффективностью описанных технических решений в области синтеза регуляторов на основе принципа локализации. По-видимому, данные проблемы характеризуют не сам принцип, а его конкретные примеры применения конкретными представителями обсуждаемой научной школы. Данная статья направлена на выяснение истины и приглашает всех возможных оппонентов к дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_локализации
- [2] Utkin V. I. Control systems with decoupling motions / V. I. Utkin, A. S. Vostrikov // Preprints of 7-th kongress IFAC. Helsinki (Finland), 1978. 1978. Vol. 2., p.967-973.
- [3] Востриков А. С. Синтез систем регулирования методом локализации: Монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 252 с.
- [4] Востриков А. С. Проблема синтеза регуляторов для систем автоматизации: состояние и перспективы. Автоматика, 2010. №2, том 46. С. 3–19.
- [5] Востриков А.С., Воевода А.А., Жмуд В.А. Эффект понижения порядка системы при управлении по методу разделения движений. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2005. № 3 (21). С. 3-13. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17425168>
- [6] Востриков А.С. Принцип локализации в задаче синтеза систем автоматического управления. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 1988. № 2. С. 42. https://www.elibrary.ru/author_items.asp?authorid=74501
- [7] Zhmud' V.A. Motions separation method for disturbances suppression in laser systems. Avtometriya. 2002. Т. 38. № 5. С. 119-126. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14965898>
- [8] V.A. Zhmud, A.A. Voevoda, A.S. Vostrikov. Control of Linear Dynamic Objects by the Method of Division of Motions. NSTU, Novosibirsk, Russia. Автоматика и программная инженерия. 2017. № 2 (20). С. 88–103.
- [9] A.A. Voevoda, V.A. Zhmud, A.S. Vostrikov. Method of Division of Motions for Control of Multi-Channel Linear Dynamic Objects. NSTU, Novosibirsk, Russia. Автоматика и программная инженерия. 2017. № 2 (20). С. 104–111.
- [10] V.A. Zhmud, A.A. Voevoda, A.S. Vostrikov. Examples of the Use of Method of Division of Motions in Practice. NSTU, Novosibirsk, Russia. Автоматика и программная инженерия. 2017. № 2 (20). С. 112–120.
- [11] Г.А. Французова, Е.П. Котова. Расчёт и исследование возможностей систем автоматического управления с типовым ПИД-регулятором и модифицированным ПИД-регулятором. Автоматика и программная инженерия. – 2017. – № 1 (19). – С. 10–15. <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%B8%D0%9F%D0%98-1-2017-1.pdf>

- [12] Д.О. Терешкин, В.М. Семибаламут. О корректности терминологии и корректности использования ПИ²Д, ПИД², ПИ²Д², ПЛ и подобных регуляторов. Сибирское отделение геофизической службы СО РАН, Новосибирск Россия. Автоматика и программная инженерия. 2017. № 3 (21). С. 123–134. <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-3-2017-12.pdf>
- [13] <https://ru.wikipedia.org/wiki/ПИД-регулятор>
- [14] Жмудь В. А. Моделирование замкнутых систем автоматического управления: учеб. пособие для академического бакалавриата / В. А. Жмудь. - 2-е изд., испр. и доп. Москва: Юрайт, 2017. 126 с. ISBN 978-5-534-03410-3.
- [15] Жмудь В. А. Системы автоматического управления высшей точности: учеб. пособие / В. А. Жмудь, А. В. Тайченачев. – Новосибирск.: Изд-во НГУ, 2016. 133 с. ISBN 978-5-4437-0603-0.
- [16] Автоматизированное проектирование систем управления.: учеб. пособие / Новосибирск, 2012: учеб.-метод. пособие / В. А. Жмудь.: НГТУ, 2012. - 72 с.
- [17] Жмудь В. А. Моделирование и численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim.: учеб. пособие / Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2012.: учеб. пособие / В. А. Жмудь.: НГТУ, 2012. - 124 с.
- [18] Zhmud V. A. Designing of the precision automatic control systems: monograph / V. A. Zhmud, L. Dimitrov. - Novosibirsk: KANT, 2017. - 126 p
- [19] Жмудь В. А. Численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim: новые структуры и методы: монография / В. А. Жмудь. – Новосибирск.: Изд-во НГТУ, 2016. - 252 с. ISBN 978-5-7782-3062-7.
- [20] Zhmud' V.A Motions separation method for disturbances suppression in laser systems. Avtometriya. 2002. Т. 38. № 5. С. 119-126. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14965898>



Вадим Жмудь – заместитель директора АО «НИПС», доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ИЛФ СО РАН, старший научный сотрудник Алтае-Саянского филиала ФГБУН Геофизической службы РАН.

E-mail: oao_nips@bk.ru

630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, д. 6/1



Александр Ляпидевский - Кандидат экономических наук, директор Новосибирского института программных систем, автор около 100 научных статей. Область научных интересов и компетенций - программные системы и инструменты, инновационные технологии.

E-mail: nips@nips.ru

Россия, Новосибирск, 630090, просп. Ак. Лаврентьева 6/1. НИПС.

Статья поступила 12.07.2022.

Testing of Effectiveness of the Regulators by the Method of Localization

V.A. Zhmud^{1,2,3}, A.V. Liapidevskiy³

¹Novosibirsk Institute of Program Systems, Russia

²Institute of Laser Physics SB RAS, Russia

³Altai-Sayan Branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Geophysical Service of the RAS

Abstract: The scientific school of NSTU in the field of control of closed dynamic systems widely uses and advertises the method of designing regulators based on the principle of localization. This method is also in some cases called the method of separation of movements, although there are other methods that are not related to it in any way, aimed at solving the same problems, bearing a similar name. New articles are published regularly, confirming the effectiveness of methods based on the principle of localization. This publication uses a numerical simulation method to explore in detail the advantages, possible disadvantages and limitations for the application of this method.

Keywords: automation, PID controller, PI²D controller, PID² controller, PI²D², PL controller.

REFERENCES

- [1] https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_локализации
- [2] Utkin V. I. Control systems with decoupling motions / V. I. Utkin, A. S. Vostrikov // Preprints of 7-th kongress IFAC. Helsinki (Finland), 1978. 1978. Vol. 2., p.967-973.
- [3] Vostrikov A. S. Sintez sistem regulirovaniya metodom lokalizatsii: Monografiya. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2007. 252 s.
- [4] Vostrikov A. S. Problema sinteza regulatorov dlya sistem avtomatiki: sostoyaniye i perspektivy. Avtometriya, 2010. №2, tom 46. С. 3–19.
- [5] Vostrikov A.S., Voyevoda A.A., Zhmud' V.A. Effekt ponizheniya poryadka sistemy pri upravlenii po metodu razdeleniya dvizheniya. Nauchnyy vestnik

- Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005. № 3 (21). S. 3-13. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17425168>
- [6] Vostrikov A.S. Printsip lokalizatsii v zadache sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye. 1988. № 2. S. 42. https://www.elibrary.ru/author_items.asp?authorid=74501
- [7] Zhmud' V.A. Motions separation method for disturbances suppression in laser systems. Avtometriya. 2002. T. 38. № 5. C. 119-126. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14965898>
- [8] V.A. Zhmud, A.A. Voevoda, A.S. Vostrikov. Control of Linear Dynamic Objects by the Method of Division of Motions. NSTU, Novosibirsk, Russia. Автоматика и программная инженерия. 2017. № 2 (20). С. 88–103.
- [9] A.A. Voevoda, V.A. Zhmud, A.S. Vostrikov. Method of Division of Motions for Control of Multi-Channel Linear Dynamic Objects. NSTU, Novosibirsk, Russia. Автоматика и программная инженерия. 2017. № 2 (20). С. 104–111.
- [10] V.A. Zhmud, A.A. Voevoda, A.S. Vostrikov. Examples of the Use of Method of Division of Motions in Practice. NSTU, Novosibirsk, Russia. Автоматика и программная инженерия. 2017. № 2 (20). С. 112–120.
- [11] G.A. Frantsuzova, E.P. Kotova. Calculation and Research of Possibilities of Automatic Control Systems with Standard PID- and Modified PID-controller. Automatics & Software Engineering. 2017. № 1 (19). P. 10–15. <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%B8%D0%9F%D0%98-1-2017-1.pdf>
- [12] D.O. Tereshkin, V.M. Semibalamut. About Correctness of the Name PI^2D , PID^2 , PI^2D^2 , PL and Similar Regulators. Automatics & Software Engineering. 2017. № 3 (21). P. 123–134. <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-3-2017-12.pdf>
- [13] <https://ru.wikipedia.org/wiki/ПИД-регулятор>
- [14] Zhmud V. A. Modelirovaniye zamknutykh sistem avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobiye dlya akademicheskogo bakalavriata / V. A. Zhmud'. - 2-ye izd., ispr. i dop. - Moskva: Yurayt, 2017. 126 s. ISBN 978-5-534-03410-3.
- [15] Zhmud V. A. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya vysshey tochnosti: ucheb. posobiye / V. A. Zhmud', A. V. Taychenachev. – Novosibirsk.: Izd-vo NGU, 2016. 133 s. ISBN 978-5-4437-0603-0.
- [16] Avtomatizirovannoye proyektirovaniye sistem upravleniya.: ucheb. posobiye / Novosibirsk, 2012: ucheb. - metod. posobiye / V. A. Zhmud': NGTU, 2012. – 72 s.
- [17] Zhmud V. A. Modelirovaniye i chislennaya optimizatsiya zamknutykh sistem avtomaticheskogo upravleniya v programme VisSim.: ucheb. posobiye / Novosib. gos. tekhn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2012.: ucheb. posobiye / V. A. Zhmud': NGTU, 2012. – 124 s.
- [18] Zhmud V. A. Designing of the precision automatic control systems: monograph / V. A. Zhmud, L. Dimitrov. - Novosibirsk: KANT, 2017. – 126 p
- [19] Zhmud V. A. Chislennaya optimizatsiya zamknutykh sistem avtomaticheskogo upravleniya v programme VisSim: novyye struktury i metody: monografiya / V. A. Zhmud. – Novosibirsk.: Izd-vo NGTU, 2016. - 252 s. ISBN 978-5-7782-3062-7.
- [20] Zhmud' V.A. Motions separation method for disturbances suppression in laser systems. Avtometriya. 2002. T. 38. № 5. C. 119-126. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14965898>



Vadim Zhmud – Vice-Head of NIPS, Assistant Professor, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, ILP SB RAS, Senior Researcher, Altai-Sayan Branch, Geophysical Survey RAS.
E-mail: oao_nips@bk.ru

630073, Novosibirsk,
str. Prosp. Lavrientieva, h. 6/1



Alexander V. Liapidevskiy, PhD in Economics, director of the Novosibirsk Institute of Program (Software) Systems, the author of about 100 scientific articles. Area of scientific interests and competences - software systems and tools, innovative technologies.
E-mail: nips@nips.ru
Russia, Novosibirsk, 630090, prosp. Ak. Lavrentieva 6/1. NIPS.

The paper has been received on 12/07/2022.