

# Корректная идентификация объекта с запаздыванием для управления им

Б.И. Пякилля, В.А. Жмудь

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия,  
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Актуальность управления объектами с запаздыванием несомненна, об этом свидетельствует нарастающий поток публикаций, в частности, [1]. Вместе с тем, зачастую теоретические результаты расчета крайне далеки от практических результатов использования полученных регуляторов для управления такими объектами. Можно предположить, что наиболее распространенной причиной этого является упрощение модели при идентификации. В данной статье на примере объекта из [1] решается вопрос о достаточности модели и допустимости ее упрощения применительно к задаче управления в контуре с отрицательной обратной связью. Поставленная задача решается путем математического моделирования в программе *VisSim*.

**Ключевые слова:** регулирование, запаздывание, идентификация объекта, настройка регулятора, моделирование, симуляция, корректность моделирования

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность задач управления объектом с запаздыванием достаточно известна, и в частности, раскрыта во введении статьи [1]. Запаздывание в значительной мере ограничивает возможности обеспечения быстродействия в контуре управления. Поэтому традиционно исследователи предполагали, что правильное определение значения запаздывания и коэффициента усиления объекта в значительной мере обеспечивает правильность модели в целом. Помимо запаздывания динамические свойства объекта могут быть описаны минимально-фазовой моделью, которая наряду с запаздыванием входит в полную модель. Простейшим примером такой модели является фильтр первого порядка. Некоторые авторы ограничивают модель именно таким фильтром. Поэтому обобщенная модель такого объекта может быть представлена передаточной функцией следующего вида [1]:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1} \cdot e^{-\tau s}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент передачи;  
 $\tau$  – время запаздывания;  
 $T$  – постоянная времени.

В данной статье ставится задача исследования, насколько такое ограничение оправдано. Актуальность этого исследования основана на

том, что именно такое обобщение (1) лежит в основе многих методов настройки регуляторов, которые используются до сих пор достаточно часто, несмотря на их малую пригодность.

Малую пригодность методом мы усматриваем, например, в таком предлагаемом алгоритме проектирования регуляторов: «Настройка контура регулирования состоит из трёх важных этапов: а) идентификация объекта, б) расчет параметров регулятора и в) подстройка регулятора. Третий этап обычно связан с ручной подстройкой параметров регулятора для улучшения качества регулирования» [1]. Как видим, авторы после теоретической настройки регулятора готовы осуществить его ручную корректировку. Это столь же странно, как если бы после того, как строитель, используя уровень, начертил вертикальную линию, после этого бы «подправил» ее положение, пользуясь своим органолептическим восприятием, то есть «на глазок». Если имеет место ручная настройка, то расчет не эффективен, и обратно: если расчет эффективен, то ручная настройка не требуется.

Мы бы считали, что целесообразно использовать один из следующих методов проектирования регулятора:

### Аналитический метод

- а) идентификация объекта;
- б) расчет регулятора;
- в) реализация регулятора (без подстройки).

### Эмпирический метод

- а) реализация регулятора;
- б) настройка регулятора эмпирическим путем.

### Комплексный метод

- а) идентификация объекта;
- б) расчет регулятора;
- в) реализация регулятора (без подстройки);
- г) уточненная идентификация объекта;
- д) уточнение расчета регулятора;
- е) реализация уточненного регулятора.

Предложенный метод, на наш взгляд, не хорош не тем, что не укладывается ни в одну из предложенных схем, а тем, что в нем расчет не имеет никакого значения, а, следовательно, и идентификация не имеет никакого значения, поэтому он, по сути, является эмпирическим методом. Наше исследование посвящено анализу влияния неучтенных особенностей реального

объекта, не входящих в модель (1).

### 1. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТА

В работе [1] предложено по традиции определять передаточные функции объектов на основании кривой разгона, вид которой для выбранного объекта показан на *Рис. 1*. При этом априорно предполагается, что модель объекта «представляются в виде последовательного соединения аperiodического и запаздывающего звеньев».

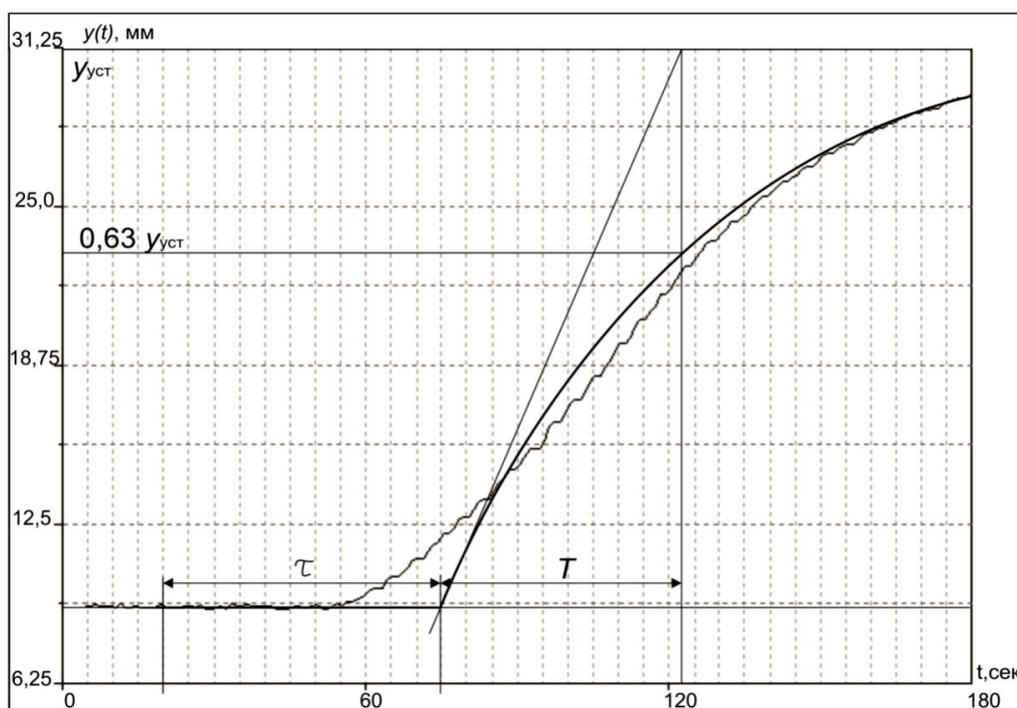
*Характеристика разгона* – это отклик на единичное ступенчатое воздействие на входе объекта. Минимально-фазовая компонента модели дает переходный процесс в виде экспоненциальной функции. Асимптота этой функции, как и асимптота кривой разгона, стремится к значению, которое равно коэффициенту усиления (передачи) объекта. На

*Рис. 1* асимптота, по-видимому, стремится к значению, показанному как максимальное значение шкалы, то есть примерно 31 единицы. Из этого следует, что входное воздействие было не равным единице, а равно этой величине, либо авторы забыли учесть коэффициент усиления. Поскольку далее в этой статье коэффициент усиления объекта везде принят равным единице, целесообразно принять первую версию, считая этот коэффициент отнесенным к величине входного скачка.

Авторами по графику *Рис. 1* определены следующие параметры передаточной функции:

$$W(s) = \frac{1}{47s + 1} \cdot e^{-55s}. \quad (2)$$

Также сказано, что из соотношения  $\tau/T < 1$  следует предположить определенные трудности настройки регулятора традиционными способами.



*Рис. 1.* Характеристика разгона при ступенчатом входном воздействии

Результаты использования регулятора, рассчитанного по модели (2), у авторов отличаются от результатов моделирования, прогнозирующего их.

Попробуем разобраться в причинах такого несовпадения. Обратим внимание на различия двух графиков – теоретического и экспериментального на *Рис. 1*. Эти отличия состоят в следующем:

1. Экспериментальный процесс начинается плавно, без резкой линии излома, теоретический процесс начинается резко с характерной линией излома.
2. Экспериментальный процесс начинается в

момент  $t = 55$  с, теоретический процесс начинается в момент  $t = 75$  с.

3. Точка первого совпадения экспериментального и теоретического процессов соответствует примерно  $t = 85$  с.

4. Далее величина экспериментального процесса меньше, чем значение теоретического процесса, максимальное отклонение составляет примерно половину деления (весь процесс асимптотически стремится к значению, соответствующему семи делениям), это максимальное отклонение соответствует времени  $t = 100$  с.

5. В экспериментальном процессе видно возбуждение с относительно высокой частотой.

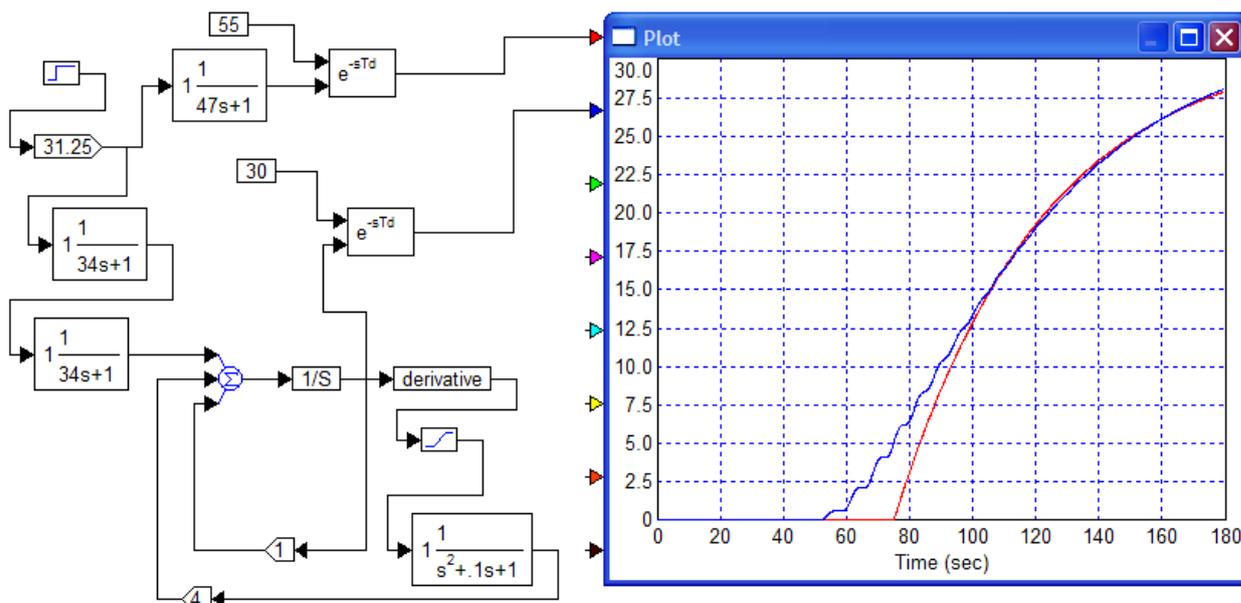
6. Амплитуда колебаний, порождаемых возбуждением, растет с ростом производной выходного сигнала; при малой скорости изменения этого сигнала величина их снижается.

7. При достижении времени  $t = 180$  с оба процесса сливаются, однако, из этого отнюдь не следует, что и далее они совпадают, хотя это и не исключено.

Причиной несовпадения общего хода процесса, очевидно, состоит в недостаточно высоком порядке модели.

Для начала попытаемся использовать модель второго порядка, например, в виде двух последо-

вательно включенных фильтров первого порядка. При этом за счет уменьшения времени чистого запаздывания и за счет подбора значения новых постоянных времени можно обеспечить требуемый ход процесса. *Рис. 2* показывает схему моделирования такого процесса, а также сам получаемый процесс в сравнении процессом на выходе модели по соотношению (2). Также в создаваемую модель введен контур с обратной связью на границе устойчивости для того, чтобы обеспечить имитацию небольшого возбуждения в виде колебаний, которые видны на *Рис. 1*.



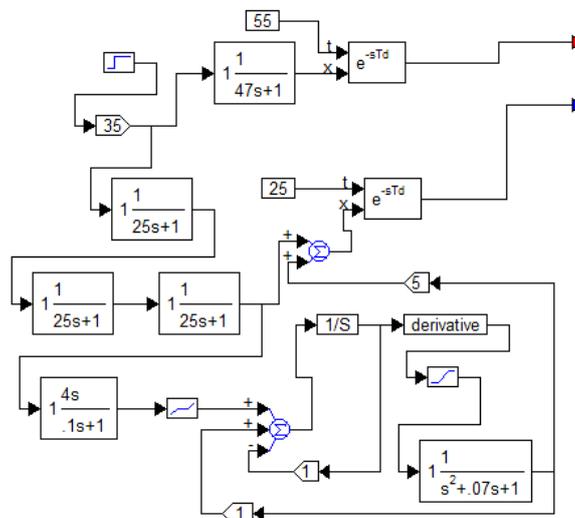
*Рис. 2.* Схема моделирования объекта и результаты в сопоставлении с моделью по соотношению (2): процесс по модели (2) – красная линия, процесс по модели в первой итерации – синяя линия

Анализ графика на *Рис. 2* показывает, что, хотя он и больше похож на экспериментальный процесс, показанный на *Рис. 1*, он все же недостаточно ему соответствует. А именно: не выполняются признаки 3, 4 и 6.

Для обеспечения условия 6 сделаем колебания зависимыми не от величины сигнала, а от ее производной, для чего используем фильтр, оценивающий производную, на его выходе поставим элемент типа «зона нечувствительности» с шириной зоны, равной единице, сигналы возбуждения введем в основной тракт через сумматор. Весовой коэффициент, равный пяти,  $K_w = 5$ , подобран экспериментально с запасом, в соответствии с развитием идеи, сформулированной в [3], согласно которой лучше использовать ухудшенную модель при расчете регулятора, чем улучшенную. Поэтому в случае сомнения выбираем худший вариант, реально достаточно было бы использовать коэффициент равный двум,  $K_w = 2$ . Для обеспечения признаков 3 и 4 используем модель в виде трех фильтров первого порядка, то есть повысим порядок объекта со второго до третьего.

На *Рис. 3* показана соответствующая модель

объекта со всеми изменениями, значения новой постоянной времени и нового запаздывания подобраны экспериментально для лучшего совпадения графика с экспериментальным процессом.

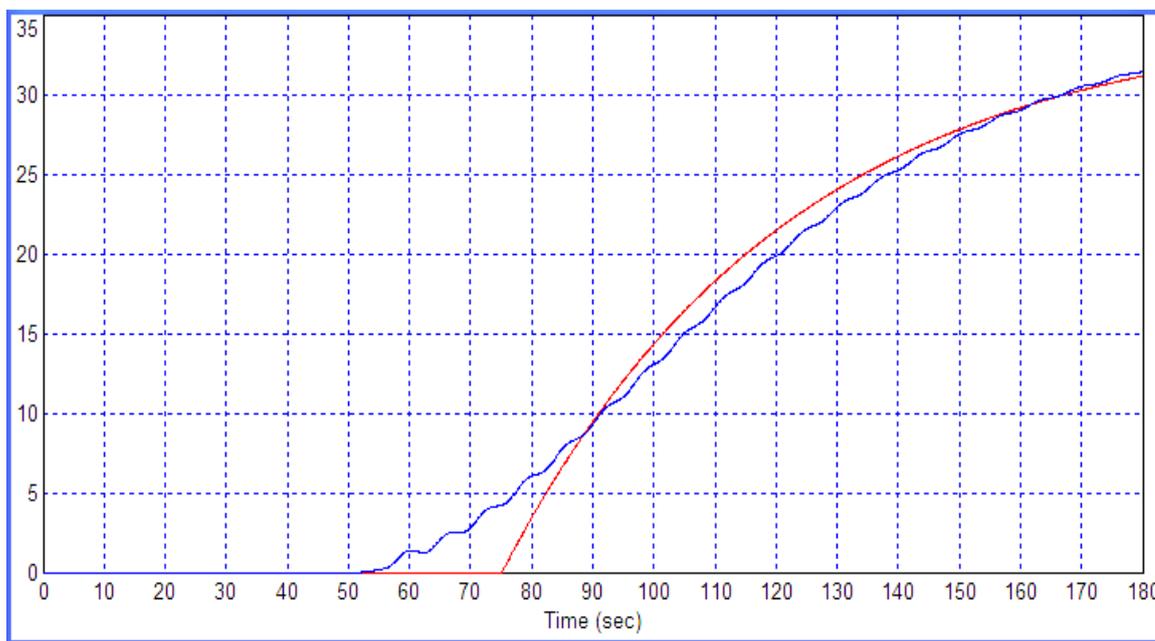


*Рис. 3.* Схема для моделирования второй итерации модели (синий выход), а также модели по соотношению (2) (красный выход)

На *Рис. 4* показан полученный переходный процесс в новой модели (синяя линия) в сравнении с процессом от модели (2) (красная линия).

Видно, что теперь совпадение двух графиков, показанных на *Рис. 4*, с двумя графиками, показанными на *Рис. 1*, достаточно хорошее. При этом красный график на *Рис. 4* совпадает с соответствующим графиком на *Рис. 1* вследствие идентичности их моделей и входных сигналов,

поэтому этот график можно использовать как опорный для анализа второго графика, синего. Отличия синего графика на *Рис. 4* от красного графика на этом же рисунке достаточно близки к отличиям экспериментального процесса на *Рис. 1* от теоретического графика на этом же рисунке. Поэтому можно сделать вывод, что модель, показанная на *Рис. 3*, и использованная для получения синего графика на *Рис. 4*, намного больше соответствует экспериментальной установке, чем модель по соотношению (2).



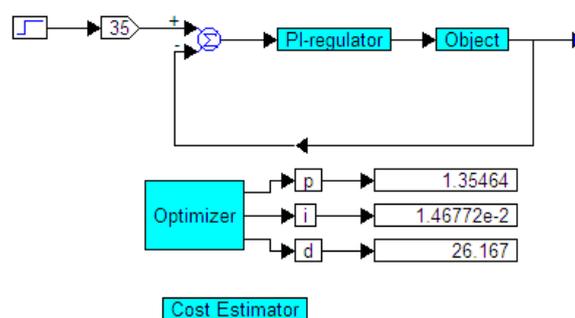
*Рис. 4.* Переходные процессы, полученные при моделировании второй итерации модели (синий выход), а также модели по соотношению (2) (красный выход)

## 2. РАСЧЕТ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ НАЙДЕННОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

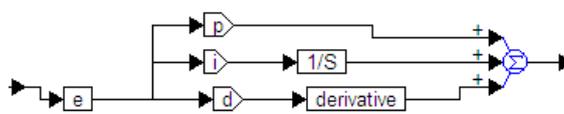
В статье [1] приведены экспериментальные переходные процессы, однако, на этих процессах не указаны отсчеты по оси времени, поэтому использовать их не представляется возможным.

Для расчета робастного регулятора используем методику, предложенную и разработанную в [2], основанную на численной оптимизации. С этой целью используем структуру, показанную на *Рис. 5*. При этом состав блоков *PI-Regulator*, *Optimizer* и *Cost Estimator* показан на *Рис. 6, 7* и *8* (отметим, что блок *PI-Regulator* по структуре соответствует ПИД-регулятору). Переходный процесс в системе показан на *Рис. 9*. Назначение стандартных блоков *parameterUnknown* можно уяснить из любого пособия по использованию программы *VisSim*, например, [1]. Эти блоки осуществляют поиск оптимальных значений своих выходных значений, которые сообщают минимальное значение стоимостной функции, которая поступает на блок *Cost*. Эти блоки работают совместно в режиме оптимизации, причем, блоков *parameterUnknown* может быть несколько, а блок

*Cost* может быть только один. Блок *derivative*, как и в структуре на *Рис. 1*, вычисляет производную по времени от входного сигнала.



*Рис. 5.* Структура системы для оптимизации регулятора



*Рис. 6.* Структура регулятора *PI-Regulator* в системе по *Рис. 5*

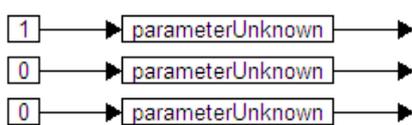


Рис. 7. Структура оптимизатора *Optimizer* в системе по Рис. 5

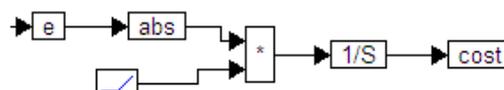


Рис. 8. Структура блока оценки стоимостной функции *Cost Estimator* в системе по Рис. 5

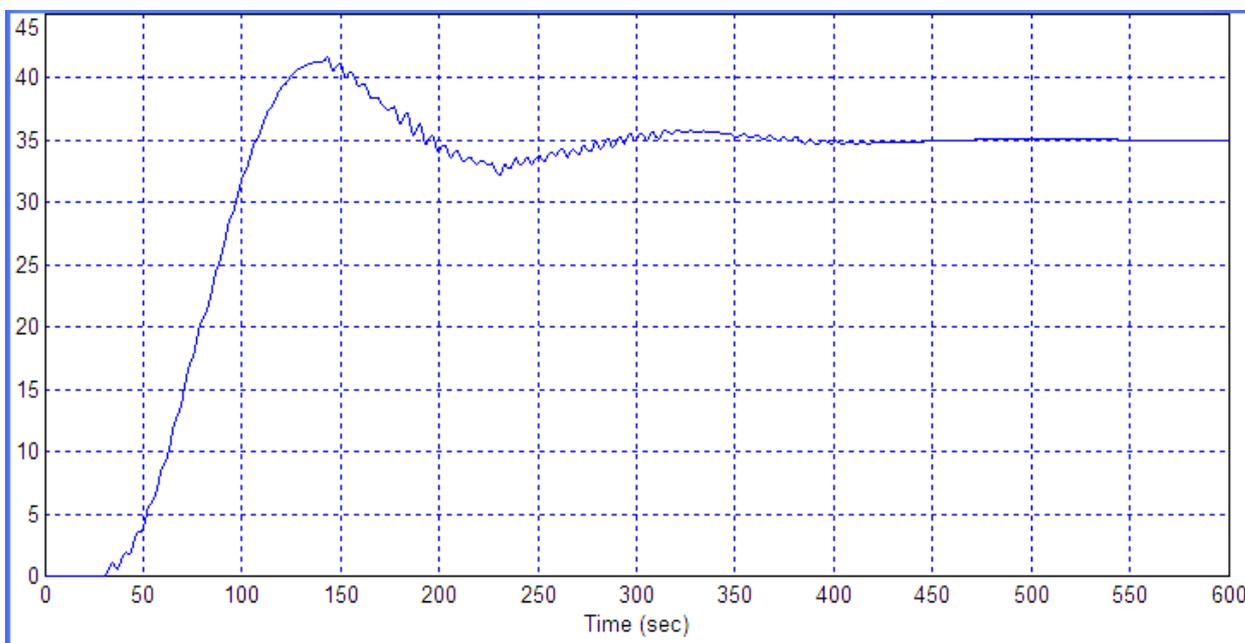


Рис. 9. Переходный процесс в системе по Рис. 5

### 3. РАСЧЕТ РОБАСТНОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА

В патенте [3] даны рекомендации по расчету робастного регулятора. Суть их сводится к тому, что следует намеренно увеличить запаздывание в модели для расчета регулятора. Тогда реальный объект будет устойчивым с полученным для такой модели регулятором. Поскольку авторами работы [1] было определено запаздывание на уровне 55 с, возьмем эту величину с запасом, а именно: используем 60 с.

Получим следующие настройки регулятора в результате процедуры оптимизации:  $K_P = 0,85$ ;  $K_I = 0,009$ ;  $K_D = 37,6$ . На Рис. 10 показан переходный процесс с заведомо ухудшенной моделью объекта, поскольку в ней коэффициент вклада контура возбуждения взят равным пяти,  $K_w = 5$ , а запаздывание взято равным  $\tau = 60$  с.

Видно, что переходный процесс в целом устойчив, установившаяся ошибка в среднем равна нулю за счет действия интегрирующего контура, но в процессе присутствуют всплески высоких частот вследствие пребывания системы на границе устойчивости. На Рис. 11 показан тот же процесс в случае, когда коэффициент вклада  $K_w = 2$ . Всплески генерации снизились до пренебрежимо малой величины. Напомним, что в статье [1] склонность объекта к возбуждению не обсуждалась и в модели не учтена.

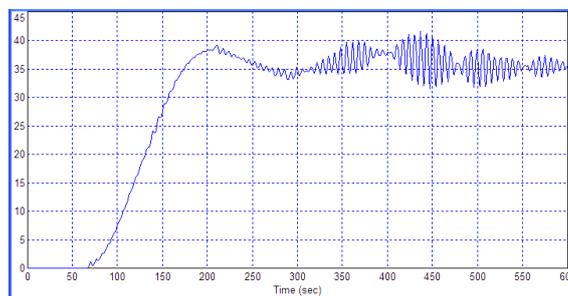


Рис. 10. Переходный процесс в системе при оптимизации ПИД-регулятора с значениями  $K_w = 5$ ,  $\tau = 60$  с

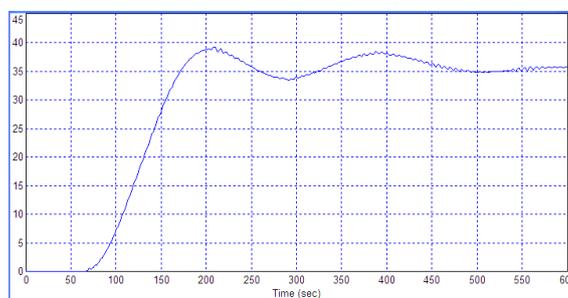


Рис. 11. Переходный процесс в системе с тем же ПИД-регулятором при  $K_w = 2$ ,  $\tau = 60$  с

На Рис. 14 показаны процессы при изменении запаздывания в объекте от 25 до 65 с, видно, что система остается устойчивой.

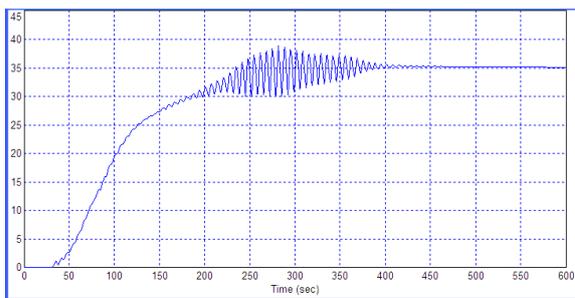


Рис. 12. Переходный процесс в системе с тем же ПИД-регулятором при  $K_w = 5$ ,  $\tau = 25$  с

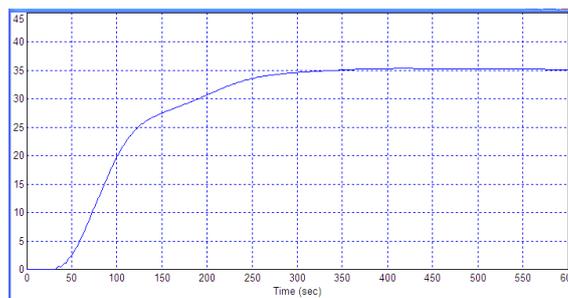


Рис. 13. Переходный процесс в системе с тем же ПИД-регулятором при  $K_w = 2$ ,  $\tau = 25$  с

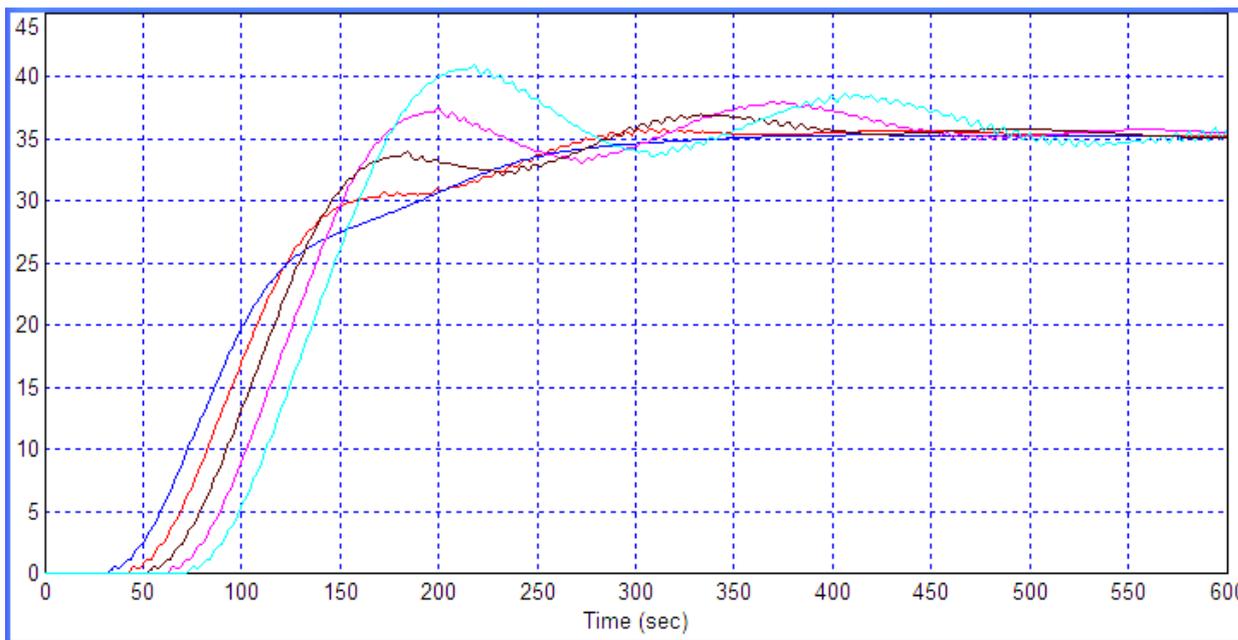


Рис. 14. Переходные процессы в системе с тем же ПИД-регулятором при  $K_w = 2$ , изменении запаздывания от  $\tau = 25$  с до  $\tau = 65$  с

Наконец, применим полученный регулятор к модели объекта по соотношению (2), которое

предложено в работе [1]. Результат такого использования показан на Рис. 15.

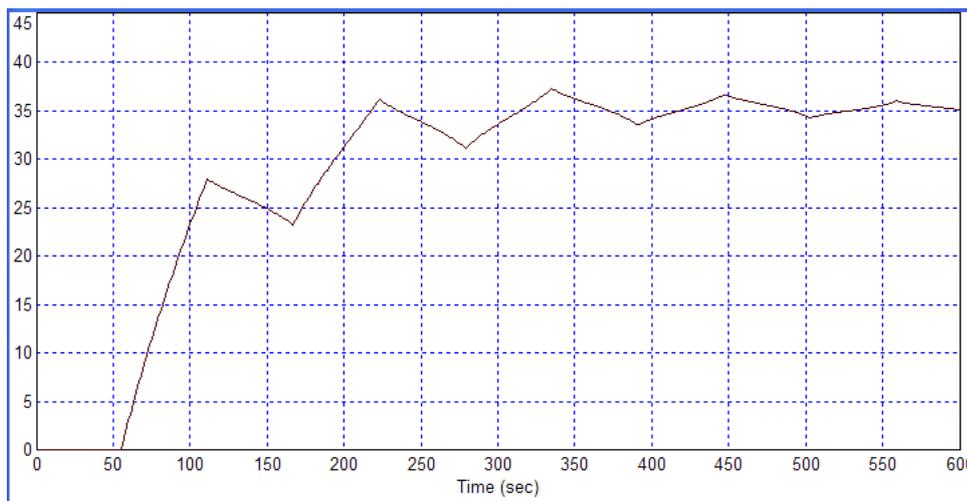


Рис. 15. Переходный процесс с тем же регулятором при модели объекта по соотношению (2)

Видно, что и в этом случае система остается

устойчивой, хотя переходный процесс характеризуется резкими скачками производной.

Этот признак объекта унаследован от модели (2), который виден на графике на Рис. 1, поскольку в реальном объекте этого признака нет, целесообразно предположить, что и в системе с реальным объектом этого признака не будет.

Таким образом, можно считать, что объект, заданный разгонной характеристикой Рис. 1, успешно идентифицирован, на основании произведенной идентификации к нему рассчитан регулятор. Ожидается, что этот регулятор не потребует дополнительной настройки после его реализации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Идентификация объекта по разгонной характеристике вида Рис. 1 может быть сделана точнее, чем предложенная в [1] модель (2). Наиболее точная модель дается соотношением:

$$W(s) = \frac{1}{(25s + 1)^3} \cdot e^{-25s}. \quad (3)$$

2. Использование модели с избыточным запаздыванием вида

$$W(s) = \frac{1}{(25s + 1)^3} \cdot e^{-60s} \quad (4)$$

позволяет рассчитать регулятор, обеспечивающий устойчивый переходный процесс с достаточным запасом устойчивости по фазе, что позволяет назвать его робастным.

Работа выполнена при поддержке фондом РФФИ, проект № 15-38-50594 «Разработка и исследование алгоритмов идентификации объектов управления с сосредоточенными и распределенными параметрами, с целью построения адаптивных систем управления и регулирования».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.В. Курганов, А.В. Цавнин. Управление объектом с запаздыванием. ФГБОУ ВО НИ ТПУ (Томск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 2 (12). С. 9–13.
- [2] Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.
- [3] Жмудь В.А., Заворин А.Н. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью. Патент РФ RU 2554291 C1. Оpubл. 27.06.2015. Бюлл. № 18.



**Вадим Аркадьевич Жмудь** – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.  
E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)



**Борис Иванович Пякилля** – ассистент кафедры компьютерных интегрированных систем Института Кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.  
E-mail: [pakillaboris@gmail.com](mailto:pakillaboris@gmail.com)

## Correct Identification and Control of Object with Time-Delay Link

Boris Pyakillya, Vadim Zhmud

*Abstract.* The relevance of control of objects with delay is beyond doubt; rising number of publications proves this, in particular [1]. However, the theoretical calculation results are often very far from practical results obtained using the controller (regulator) to control these objects. We can assume that the most common reason for this is too fundamental simplification of the model in the result of the identification. It can be named uncorrect identification. This paper use the example object from [1] to test its adequacy of the model and its admissibility of simplifying in relation to the task the control design with the helps of negative feedback loop. The correct identification mean usability of the result for the calculation of the regulator for the object by means of any possible method, including numerical optimization. The paper resolves the stated problem of the identification based in the comparison of the resulting transient processes from the experiment and from the simulation. In addition, it gives the results of the regulator calculation by means of numerical optimization on the base of the mathematical modeling (simulation) in program VisSim.

*Key words:* regulation, time-delay, object identification, configuration of control, modeling, simulation, simulation correctness.

## REFERENCES

- [1] V.V. Kurganov, A.V. Cavnin. Upravlenie ob#ektom s zapazdyvaniem. FGBOU VO NI TPU (Tomsk, Rossija). Avtomatika i programmnaja inzhenerija. 2015. № 2 (12). S. 9–13.
- [2] Zhmud' V. A. Modelirovanie, issledovanie i optimizacija zamknutyh sistem avtomaticheskogo upravlenija. Monografija. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2012. – 335 s.
- [3] Zhmud' V.A., Zavorin A.N. Struktura modeli dlja optimizacii sistemy s obratnoj svjaz'ju. Patent RF RU 2554291 C1. Opubl. 27.06.2015. Bjull. № 18.