

# Исследование причин шумов при многократном дифференцировании сигнала цифровым способом

В.А. Жмудь<sup>1,2</sup>, Л.В. Димитров<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО НГТУ, <sup>2</sup>ИЛФ СО РАН,  
<sup>3</sup>Технический университет Софии, София, Болгария

**Аннотация:** Дифференцирование сигналов часто требуется для управления различными динамическими объектами [1–8]. Дифференцирование позволяет повысить устойчивость системы, поскольку позволяет реагировать не только на фактическое увеличение ошибки управления, но и учитывать тенденцию роста или уменьшения этой ошибки. Дифференцирование увеличивает запас устойчивости по фазе. Имеются методы проектирования регуляторов, основанные на многократном дифференцировании. Некоторые исследователи категорически протестуют против этого, указывая, что многократное дифференцирование повышает уровень шумов, другие исследователи утверждают, что производные сколь угодно высокого порядка полезны. В связи с развитием цифровой техники неизбежен повсеместный переход на цифровые системы управления с полным отказом от аналоговой техники (кроме АЦП и ЦАП) для этих целей. В связи с этим актуально исследование причин зарождения шумов при многократном дифференцировании и оценка уровня этих шумов. Данная статья осуществляет эти исследования путем моделирования в программе *VisSim*, которая по своим алгоритмам действия идентична работе цифрового регулятора.

**Ключевые слова:** цифровые регуляторы, сигнальные процессоры, шумы дифференцирования, моделирование, *VisSim*

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования причин зарождения и увеличения шумов при многократном дифференцировании диктуется использованием такого дифференцирования в системах автоматического управления [1–9]. Программа *VisSim* позволяет моделировать сигналы по методу численного интегрирования и дифференцирования в соответствии с моделями элементов, которые составляют основу любой моделируемой системы [5–9]. Большое преимущество этой программы перед другими программными средствами для моделирования состоит в том, что она действует именно так, как действует цифровой регулятор

на основе микроконтроллера, микропроцессорного устройства или сигнального процессора, называемого далее обобщенно цифровым регулятором.

## 1. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Для управления сложными динамическими объектами имеется несколько методов, требующих многократного дифференцирования входных сигналов. Один из таких методов – метод локализации, иначе называемый методом старшей производной. При этом могут понадобиться производные старших порядков – третьей и выше.

Часть преподавателей и ученых, и почти большинство инженеров-практиков настойчиво утверждают, что дифференцирование выше второго порядка не желательно, так как это повышает шумы, и, соответственно, снижает отношение сигнал/шум. Другая часть преподавателей и ученых все же настаивает на том, что дифференцирование сколь угодно высокого порядка может быть осуществлено без проблем.

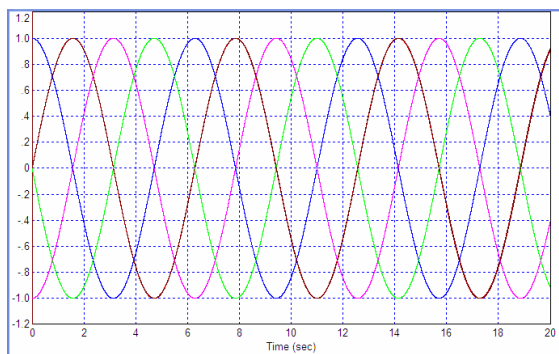
По-видимому, истина находится посередине: дифференцирование первого порядка признают полезным все, дифференцирование второго порядка, по-видимому, полезно и достижимо во многих случаях, дифференцирование излишне высокого порядка в большинстве случаев, действительно, бесполезно, поскольку уровень порождаемых этой операцией шумов существенно превышает уровень сигнала. Производные высших порядков могут быть легко вычислены аналитически, если известен аналитический вид сигнала, например, такими программами, как *MATLAB (Simulink)*, но это никак не связано с практическим решением вычисления производных высших порядков для сигналов, данных исследователю лишь в их дискретных отсчетах. Если программа *VisSim* справляется с задачей вычисления старших производных, то можно с уверенностью утверждать, что и цифровой регулятор на практике также успешно решит эту задачу с таким же входным сигналом, поскольку эти программные и программно-аппаратные средства действуют по идентичным алгоритмам.

Поэтому актуально исследование того, как на практике программа *VisSim* вычисляет производные старшего порядка, какие могут при этом возникать ограничения, каковы причины неудачи (если она имеет место).

Напомним, что указанная программа вычисляет интеграл через сумму всех получаемых отсчетов сигнала, и, соответственно, производная вычисляется в ней как разность этих отсчетов.

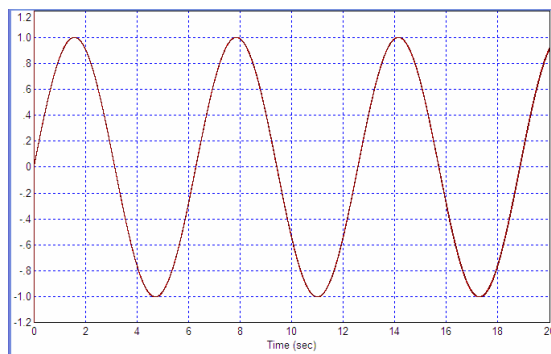
## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На *Рис. 1* показаны результаты моделирования гармонического сигнала и вычисления его производных, до четвертой включительно. При единичной частоте гармонического сигнала все производные имеют ту же амплитуду сигнала, которая имеется во входном сигнале. Эта амплитуда была задана единичной. При таких условиях моделирования проще обнаружить изменения уровня шумов. Как видим, исходный сигнал и его производные, с первой по четвертую, отображаются без шумов. Во всяком случае, шумы не заметны на фоне толщины линии на графике. В частности, четвертая производная сливается с исходным сигналом, что более наглядно видно на *Рис. 2*, где остальные сигналы удалены.

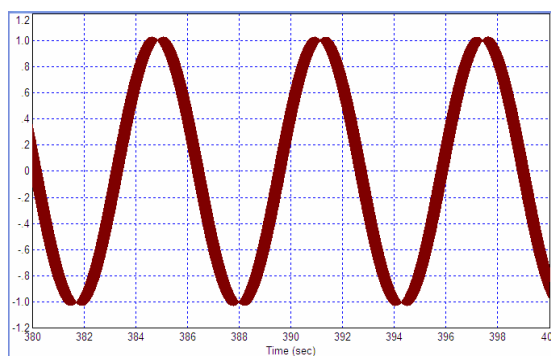


*Рис. 1.* Исходный сигнал единичной частоты и амплитуды и его производные, с первой по четвертую: визуально шумов не прибавилось  
 $d(\sin t)/dt = -\cos t$ ,  $d^2(\sin t)/dt^2 = -\sin t$ ,  
 $d^3(\sin t)/dt^3 = -\cos t$ ,  $d^4(\sin t)/dt^4 = \sin t$

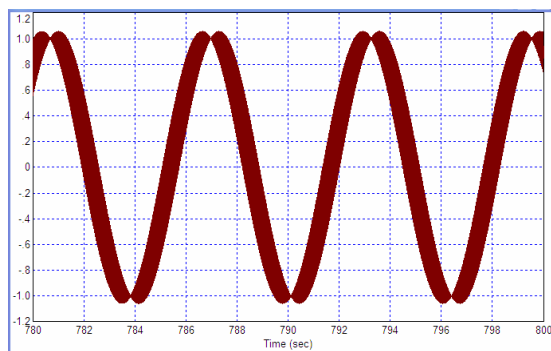
Если этот же самый сигнал рассмотреть детально на другом интервале времени той же длительности, в частности, по истечении 380 с, как показано на *Рис. 3*, видно, что сигнал четвертой производной обладает заметным уровнем шумов, в отличие от исходного сигнала. Если рассмотреть сигнал еще далее, то видно, что шумы в нем еще больше увеличиваются, как показано на *Рис. 4*.



*Рис. 2.* Исходный сигнал и его четвертая производная сливаются, отличий не видно:  
 $d^4(\sin t)/dt^4 = \sin t$



*Рис. 3.* Тот же исходный сигнал единичной частоты и амплитуды, что на *Рис. 1*, и его четвертая производная по истечении времени 380 с: визуально уровень шумов в сигнале производной выше, чем в исходном сигнале



*Рис. 4.* Тот же исходный сигнал единичной частоты и амплитуды, что на *Рис. 1*, и его четвертая производная по истечении времени 380 с: визуально уровень шумов в сигнале производной выше, чем в исходном сигнале

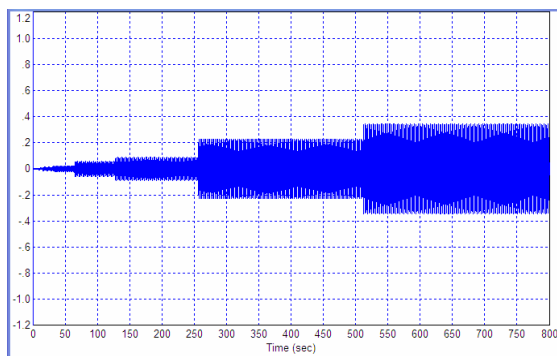
**Вывод 1.** Даже если при моделировании на коротком интервале времени уровень шумов старшей производной повышается несущественно, это не дает гарантии такого же пренебрежимо малого уровня шумов на всем протяжении интервала моделирования.

Рассмотрим разность между исходным сигналом и его четвертой производной, которая вследствие правила дифференцирования гармонического сигнала должна совпадать с

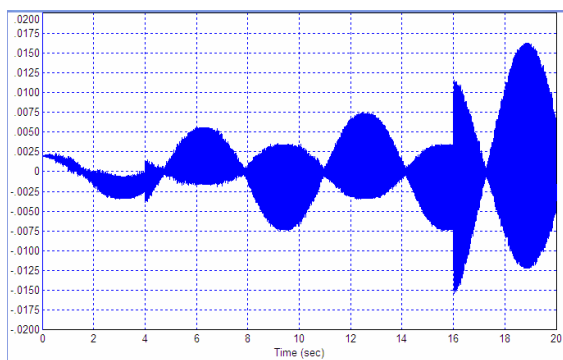
исходным сигналом:  $d^4(\sin t)/dt^4 = \sin t$ . В силу этого соотношения разность должна быть равной нулю:  $\sin t - d^4(\sin t)/dt^4 = 0$ . Однако при рассмотрении этой разницы на длительном интервале выявляется, что этот разностный сигнал не только не равен нулю, но еще и возрастает по мере увеличения времени моделирования, как показано на *Рис. 5*.

Видно, что со временем шумы четвертой производной растут скачком. На *Рис. 6* показан фрагмент скачкообразного роста шумов на интервале времени от 0 до 20 с при более крупном масштабе по оси ординат. На последующих графиках показаны аналогичные фрагменты при каждом последующем скачкообразном росте шумов. В частности, на *Рис. 7* приведен фрагмент на интервале от 58 до 74 с, на *Рис. 8* – фрагмент на интервале от 250 до 265 с, на *Рис. 9* – фрагмент от 256 до 258 с, на *Рис. 10* – фрагмент от 256,6 до 256,6 с.

Увеличение шумов связано с накоплением влияния ошибки дискретности.

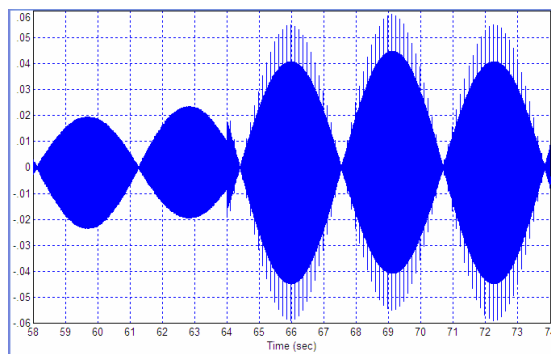


*Рис. 5.* График изменения вычисленной в программе *VisSim* разницы между исходным сигналом и его четвертой производной

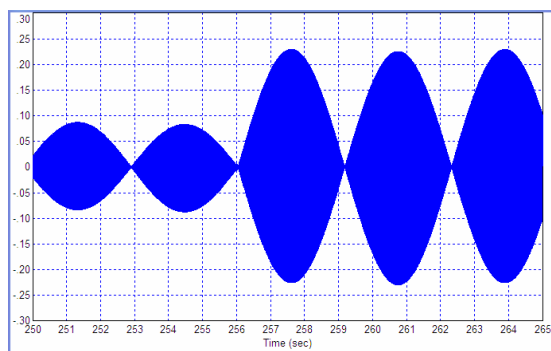


*Рис. 6.* Детальное рассмотрение графика по *Рис. 5* на интервале от 0 до 20 с

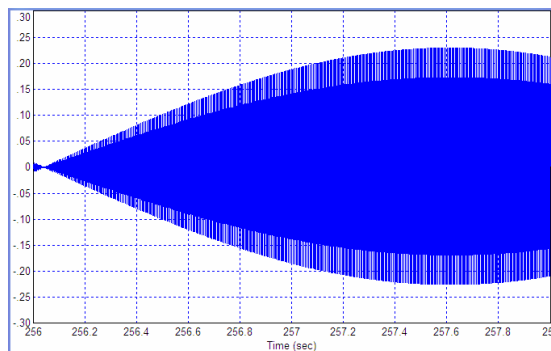
**Вывод 2.** Даже при моделировании сигнала без шума, имеется «шум моделирования», который усиливается при дифференцировании.



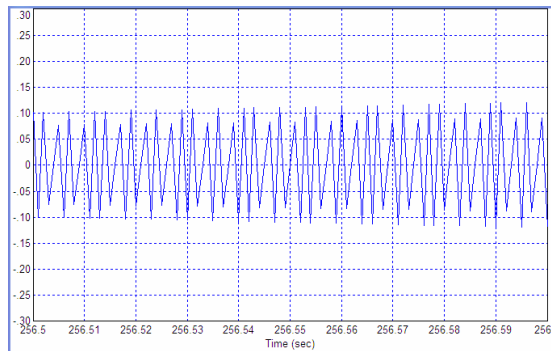
*Рис. 7.* Детальное рассмотрение графика по *Рис. 5* на интервале от 58 до 74 с



*Рис. 8.* Детальное рассмотрение графика по *Рис. 5* на интервале от 250 до 265 с



*Рис. 9.* Детальное рассмотрение графика по *Рис. 5* на интервале от 256 до 258 с



*Рис. 10.* Детальное рассмотрение графика по *Рис. 5* на интервале от 256,6 до 256,6 с

Рассмотрим пятую производную этого сигнала, как показано на *Рис. 11*. Эта произ-

водная существенно превышает сигнал. Графики Рис. 11 получены при выборе шага квантования по времени (шага интегрирования) равного 0,001 с. На Рис. 12 показан результат такого же моделирования после увеличения вдвое шага интегрирования, т. е. до значения 0,002 с.

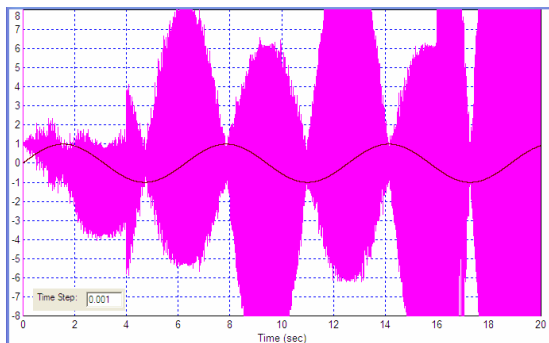


Рис. 11. Исходный сигнал и его пятая производная при выборе шага интегрирования 0,001 с: уровень шумов пятой производной намного превышает уровень сигнала

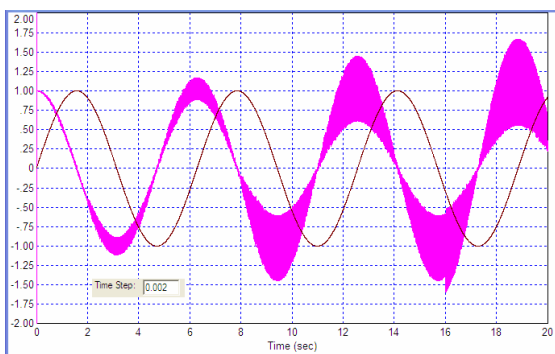


Рис. 12. Тот же исходный сигнал, что на Рис. 11, (исходный сигнал и его пятая производная) при увеличении шага интегрирования до значения 0,002 с: уровень шумов пятой производной снизился до его значения остается существенным

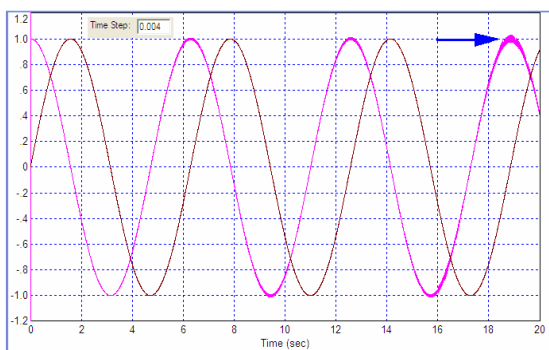


Рис. 13. Тот же исходный сигнал, что на Рис. 11, (исходный сигнал и его пятая производная) при увеличении шага интегрирования до значения 0,004 с: уровень шумов снизился почти везде, но в областях с медленным изменением сигнала уровень шумов выше, и он увеличивается с течением времени

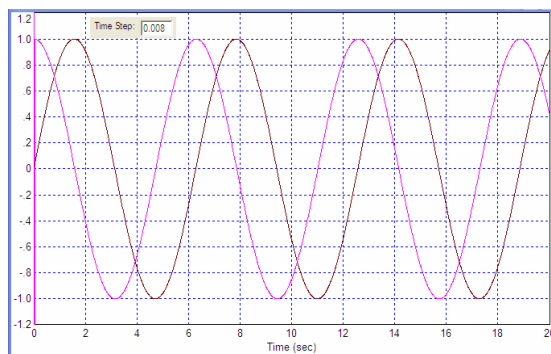


Рис. 14. Тот же исходный сигнал, что на Рис. 11, (исходный сигнал и его пятая производная) при увеличении шага интегрирования до значения 0,008 с: уровень шумов снизился до значения, не различимого на этом графике

**Вывод 3.** Увеличение шага интегрирования уменьшает влияние высокочастотных шумов при дифференцировании.

**Примечание к выводу 3.** Увеличение шага интегрирования не может служить средством борьбы с ростом шумов при многократном дифференцировании, так как оно вызывает потерю точности моделирования. Теоретическим обоснованием факта снижения влияния шумов не может служить то, что при вычислении производной шаг интегрирования стоит в знаменателе. Несмотря на то, что, действительно, поэтому, чем меньше шаг, тем выше вклад отдельного отсчета в результат вычисления производной, все же рост влияния шумов несоизмерен с уменьшением шага интегрирования, и эта зависимость явно нелинейна.

Таким образом, при шаге интегрирования 0,008 с в пятой производной на начальном интервале в 20 с не заметно шумов (хотя они имеются, но их величина меньше отображаемой ширины линии графика).

Далее рассмотрим моделирование шестой производной. Результат моделирования показан на Рис. 15. По истечении 8 с шум шестой производной возрастает до заметного значения. Увеличим шаг интегрирования до значения 0,05 с. Результат показан на Рис. 16. Видно, что хотя в большей части сигнала шумы снизились до значения, менее ширины линии, но в самом начале моделирования в сигнале шестой производной имеются чрезвычайно большие шумы. Дальнейшее увеличение шага интегрирования не устраняет этой проблемы, как видно из Рис. 17. Начальный участок с большими шумами увеличивается.

**Вывод 4.** Чем выше порядок производной, тем сильнее сказываются шумы, что доказано экспериментально.

Данный вывод ожидаем, но он в данном случае убедительно подтвержден экспериментально.

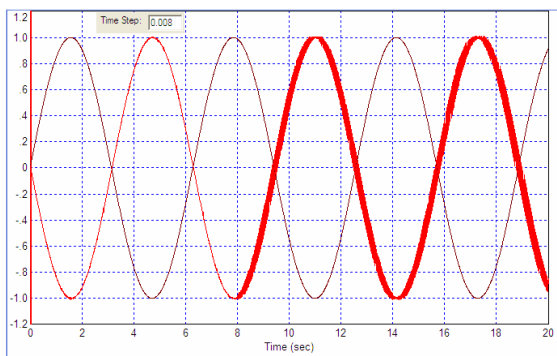


Рис. 15. Исходный сигнал и его шестая производная при шаге интегрирования 0,008 с: на второй половине интервала моделирования шум в шестой производной возрастает до заметных значений

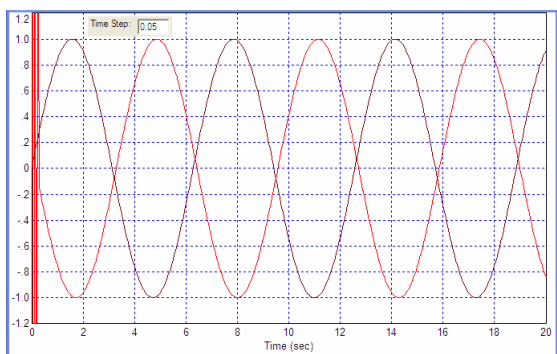


Рис. 16. Моделирование тех же сигналов, что на Рис. 15 после увеличения шага интегрирования до значения 0,05 с

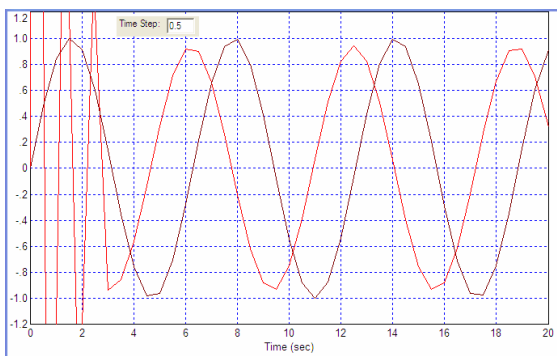


Рис. 17. Те же сигналы, что на Рис. 16 после увеличения шага интегрирования до значения 0,5 с

**Вывод 5.** Уменьшение шага интегрирования не решает проблему окончательно: положительный эффект от этого действует лишь в ограниченных рамках.

Рассмотрим третью производную от линейно нарастающего сигнала. Результат моделирования показан на Рис. 18. видно также, что с течением времени этот сигнал нарастает скачкообразно. Само значение этих шумов не велико, рассмотреть эти шумы удастся лишь в результате соответствующего изменения масштаба по оси ординат. На Рис. 19 показана вторая производная линейно нарастающего сигнала, а на Рис. 20 – тот же сигнал детально (укрупнено по времени).

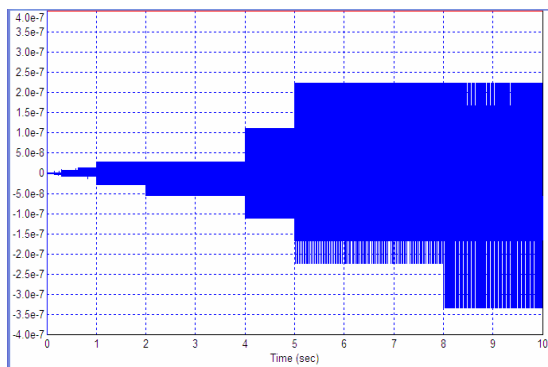


Рис. 18. Третья производная линейно нарастающего сигнала

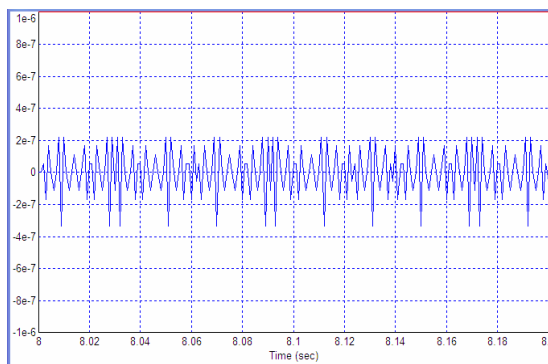


Рис. 19. Детальное рассмотрение сигнала с рис. 18

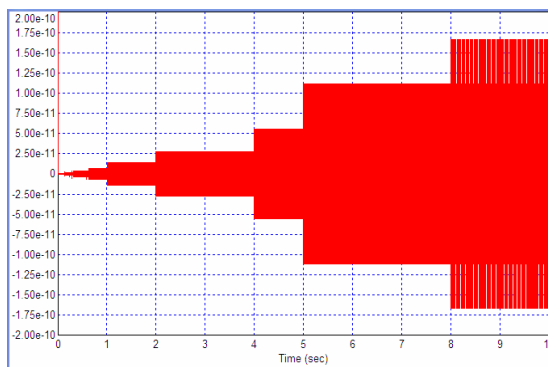


Рис. 19. Вторая производная линейно нарастающего сигнала

Рассмотрим детально зарождение шумов при дифференцировании на примере сигнала, полученного после прохождения ступенчатого сигнала через фильтр пятого порядка, как показано на Рис. 21. Сигнал седьмой производной, показанный на Рис. 21, имеет существенные шумы. На Рис. 22 показан укрупненный фрагмент этой части Рис. 21. Видно, что предыдущая производная, то есть шестая, содержит шумы в этой области, которые и являются причиной чрезмерно больших шумов седьмой производной.

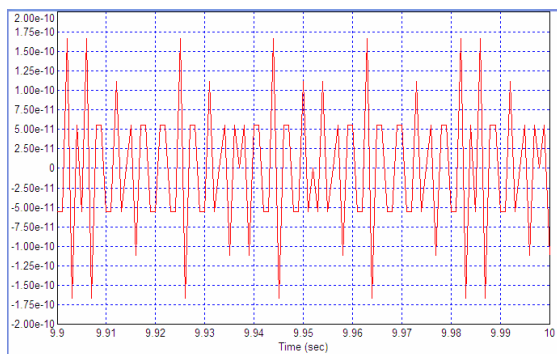


Рис. 20. Детально рассмотренный сигнал по Рис. 19

На Рис. 23 показан укрупненный фрагмент этого участка шестой производной с шумами, на Рис. 24 он показан совместно с предшествующей пятой производной. Выделим вершину локального максимума этой пятой производной и рассмотрим ее детально, как показано на Рис. 25. Видно из этого графика, что сигнал плавный лишь в среднем, а на самом деле он не плавный и не монотонный, а совершает колебания около среднего, почти с каждым новым шагом изменяя знак отклонения от этого среднего значения. Сигнал, который должен изменять направление своего изменения плавно, на самом деле многократно и часто отклоняется от своей средней траектории, что порождено дискретностью во времени.

**Вывод 6.** Причиной резкого роста производной высшего порядка является существенная немонотонность производной более низкого порядка, которая в свою очередь порождена дискретностью дифференцируемого сигнала.

Указанные проблемы проявились только вследствие дискретности по времени. При работе цифрового регулятора имеет место не только дискретность по времени, но также и дискретность по уровню. Действительно, даже если использовать 20-разрядный АЦП (что является достаточной экзотикой), то погрешность преобразования составляет приблизительно одну единицу шестого знака, тогда как при моделировании в программе *VisSim* никакой погрешности по уровню не предполагается, имеется лишь дискретность по времени. Таким образом, при работе цифрового регулятора ситуация намного хуже, чем та, которая получена при моделировании.

Выше мы рассматривали только сигнал без шумов, т. е. не использовали генератор шумов. В сигнале при этом присутствовали отличия от идеального сигнала вследствие метода формирования исходного сигнала при моделировании. Рассмотрим моделирование сигнала, в котором имеются шумы, пусть даже крайне медленного уровня. Зададим уровень стандартного отклонения гауссовых шумов на уровне  $10^{-9}$ . Отметим, что это на три порядка меньше, чем шум дискретизации самого точного АЦП, двадцатиразрядного. На Рис. 27

показано поле для задания такого шума при моделировании.

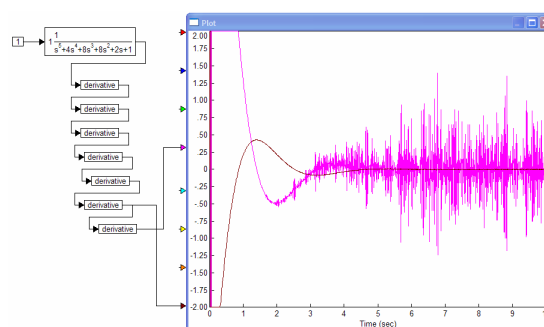


Рис. 21. Результат моделирования шестой и седьмой производной от сигнала на выходе фильтра пятого порядка: видно, что в шестой производной шумы малы, а в седьмой производной они уже чрезмерны

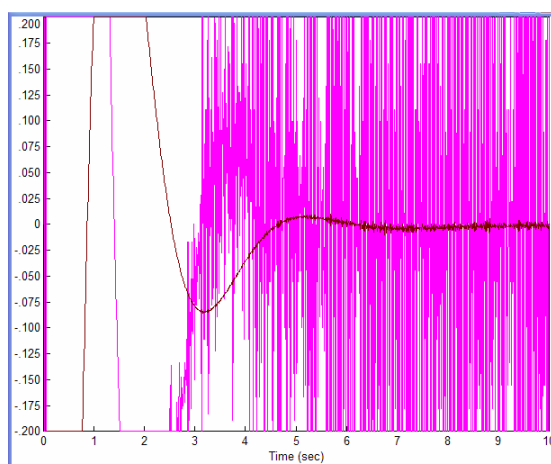


Рис. 22. Укрупненный фрагмент сигналов из Рис. 12 на стадии зарождения шумов: видно, что источник чрезмерных шумов седьмой производной имеется в шестой производной

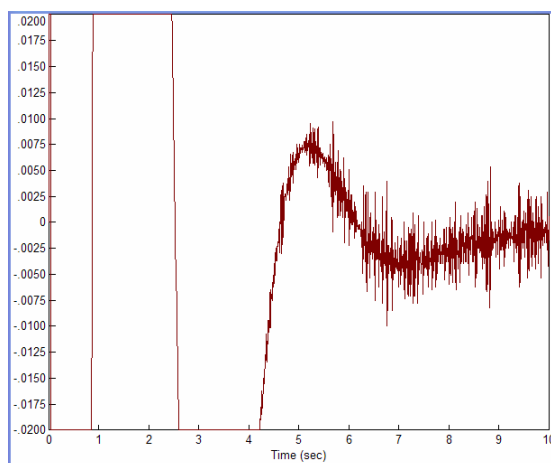


Рис. 23. Укрупненное рассмотрение сигнала шестой производной из Рис. 22

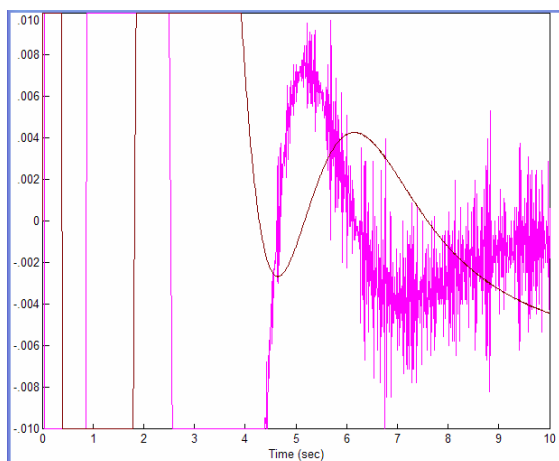


Рис. 24. Совместное укрупненное рассмотрение сигнала шестой производной из Рис. 23 и порождающей ее пятой производной: причины шумов шестой производной в пятой производной по виду графика не выявляются

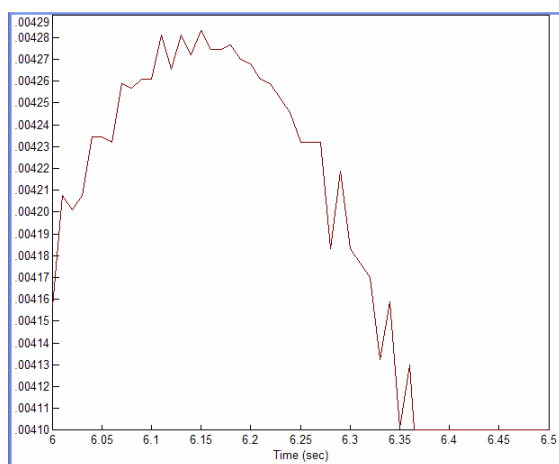


Рис. 25. Более детальное рассмотрение сигнала пятой производной из Рис. 24 и порождающей ее пятой производной: видны причины резкого роста шумов шестой производной: дискретность сигнала такова, что сигнал из кусочно-монотонного превращается в существенно немонотонный, то есть изменяет направление роста (знак производной) почти на каждом новом шаге интегрирования

На Рис. 28 показан результат моделирования такого шума. Среднеквадратичное отклонение в данном случае приблизительно в три раза меньше пикового значения, которое достигает  $3 \cdot 10^{-9}$ .

Первая производная этого шума показана на Рис. 29. Видно, что пиковое значение шума достигает значения  $4 \cdot 10^{-7}$ , т. е. возросло вследствие дифференцирования в 200 раз. Вторая производная показана на рис. 30, видно, что пиковое значение шума достигает значения  $8 \cdot 10^{-5}$ , т. е. возросло вследствие дифференцирования еще в 200 раз.

Третья производная показана на Рис. 31, видно, что пиковое значение шума достигает значения 0,0125, т. е. оно возросло вследствие дифференцирования еще более чем в 150 раз.

Четвертая производная показана на Рис. 32, пиковое значение шума достигает значения 2,5, т. е. шумы возросли вследствие дифференцирования еще в 200 раз.

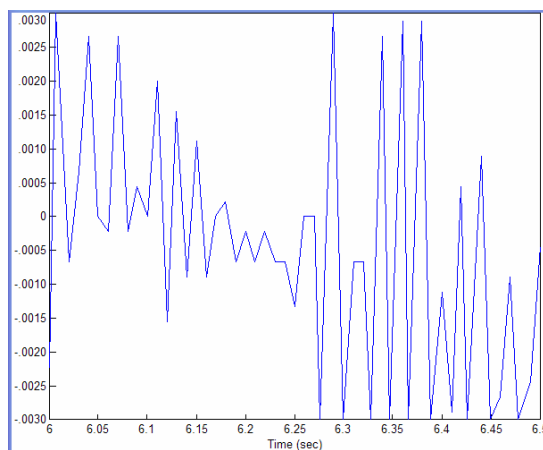


Рис. 26. Более детальное рассмотрение сигнала шестой производной – результата дифференцирования сигнала из Рис. 25: видно, что причины, выявленные из Рис. 25 (немонотонность), дают свои следствия в виде резкого колебательного характера производной этого сигнала

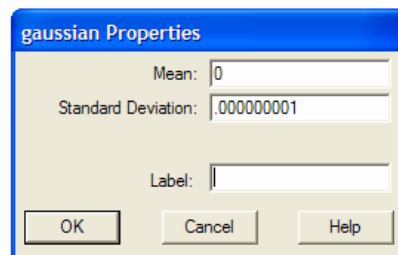


Рис. 27. Установки генератора гауссова шума: стандартное отклонение взято чрезвычайно малым, равным  $10^{-9}$

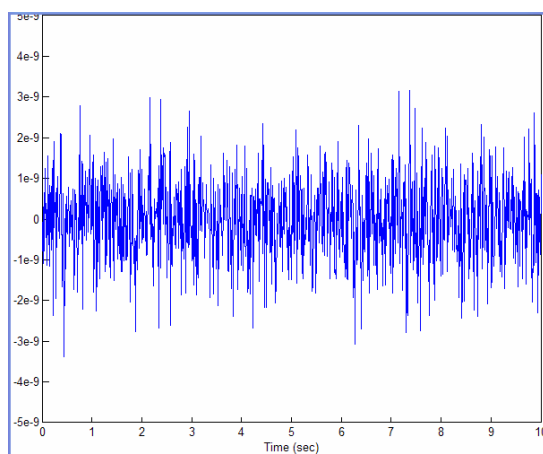


Рис. 28. Вид сигнала от генератора гауссова шума по установкам согласно Рис. 27

**Вывод 7.** Каждое цифровое дифференцирование высокочастотных гауссовых шумов может вызвать увеличение шума в 200 раз.

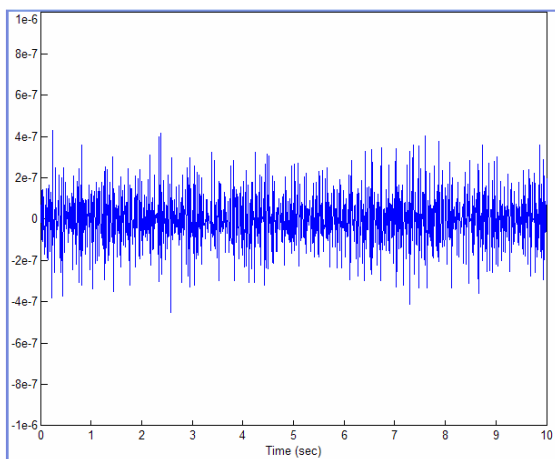


Рис. 29. Производная сигнала из Рис. 28 (первая производная исходного сигнала)

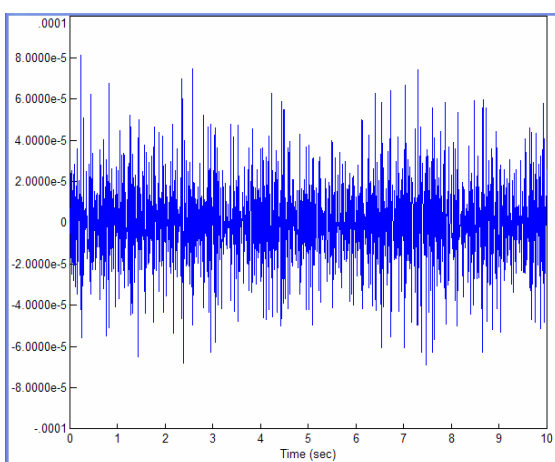


Рис. 30. Производная сигнала из Рис. 29 (вторая производная исходного сигнала)

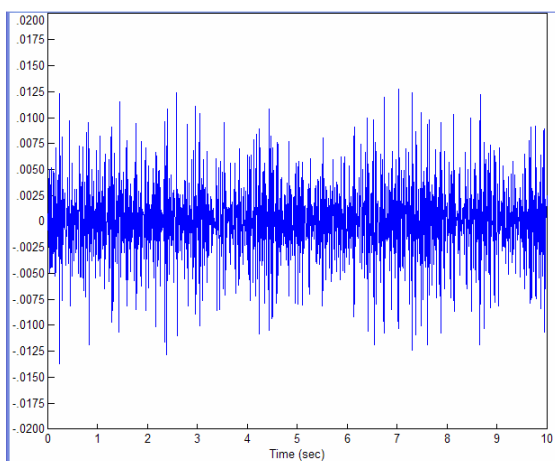


Рис. 31. Производная сигнала из Рис. 30 (третья производная исходного сигнала)

При последней серии моделирования использовался такой уровень шумов, который, как минимум, в 100 раз меньше, чем шумы лучшего АЦП.

Кроме того, действительно идеальное дифференцирование может повысить шумы более чем в 200 раз, поскольку в этом случае

коэффициент усиления шумов пропорционален их частоте.

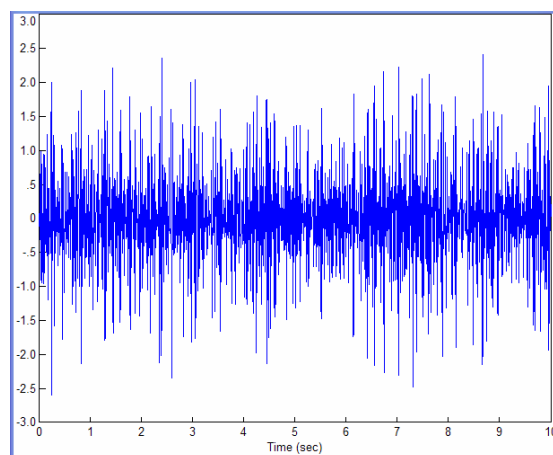


Рис. 32. Производная сигнала из Рис. 31 (четвертая производная исходного сигнала)

На этом основании можно заключить, что дифференцирование высокого порядка, действительно, следует использовать с крайней осторожностью.

Можно было бы предложить локальное или «реальное» дифференцирование, которое состоит в дифференцировании только в ограниченном частотном диапазоне. Это можно реализовать последовательным включением идеального дифференцирующего устройства и НЧ фильтром первого порядка на частоту, в 100–1000 раз превышающую частоту среза дифференцирующего устройства. К сожалению, такое применение полностью нивелирует высокий порядок дифференцирования.

Действительно, в системах обратной связи можно выделить три частотных диапазона:

1. Область низких частот, где требуется большое усиление.

2. Область средних частот, где требуется малый наклон логарифмической амплитудночастотной характеристики.

3. Область высоких частот, где достаточно, чтобы значение этой характеристики было во много раз меньше единицы (в 50 раз и более).

Многочасное дифференцирование требуется в области средних частот, а фильтр НЧ может исправить ситуацию только в области ВЧ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований можно утверждать, что дифференцирование высокого порядка все же крайне нежелательно. Дискретность по времени является достаточной причиной для возникновения этой проблемы. Несмотря на то, что наиболее явно проявляется эффект роста шумов в производных, начиная с четвертой или пятой, на деле ситуация в реальных системах намного хуже по следующим причинам: а) наличие фактических



шумов в любом датчике, следовательно, существенные шумы в каждой системе; б) наличие более существенной ошибки дискретности по уровню.

Статья вскрывает причины резкого роста шумов, которые состоят в том, что при медленном изменении производной соответствующего порядка шум дискретности превышает последующую производную, что дает систематическую смену знака этой производной.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Performance evaluation of PID controller for automatic generation control in interconnected thermal system with reheat turbine in deregulated environment. 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI), 2015, DOI: 10.1109/KBEI.2015.7436221, Publisher: IEEE, Conference Location: Tehran, Iran. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7436221/?reload=true>
- [2] Востриков А. С. Проблема синтеза регуляторов для систем автоматизации: состояние и перспективы // Автоматизация. 2010. Т. 46. № 2. С.3–19.
- [3] Востриков А.С., Французова Г.А. Синтез PID-регуляторов для нелинейных нестационарных объектов // Автоматизация. 2015. Т. 51. № 5. С. 53–60.
- [4] Г.А. Французова, Е.П. Котова. Расчёт и исследование возможностей систем автоматического управления с типовым ПИД-регулятором и модифицированным ПИ2Д-регулятором. Автоматика и программная инженерия. 2017. № 1 (19). С. 10–15.
- [5] Жмудь, В. А. Моделирование замкнутых систем автоматического управления: учебное пособие для академического бакалавриата / В. А. Жмудь. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 126 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978-5-534-03410-3. URL: <http://urait.ru/catalog/403830>
- [6] В.А. Жмудь, В.А. Тайченачев. Системы автоматического управления высшей точности: учеб. пособие, В.А. Жмудь, А.В. Тайченачев; Новосиб. Гос. ун-т – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2016. – 178 с.
- [7] С.В. Каменский, Г.А. Французова, Г.П. Чикильдин, В.А. Жмудь, А.С. Востриков, Ю.Е. Воскобойников, Е.А. Басыня, В.Г. Трубин. Системы автоматического управления, мехатроники и робототехники: монография / коллектив авторов; под общей редакцией Г.А. Французовой. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 210 с.
- [8] V A Zhmud, L V Dimitrov. The influence of the type of the test signal on the result of numerical optimization of regulators. . IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 803 (2017) 012186 doi:10.1088/1742-6596/803/1/012186. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012186/pdf>
- [9] V A Zhmud, I L Reva, L V Dimitrov. Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 803 (2017) 012185 doi:10.1088/1742-6596/803/1/012185.

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012185/pdf>

## Investigation of the Causes of Noise by Multiple Digital Derivations of Signals

VADIM ZHMUD, LUBOMIR DIMITROV

Novosibirsk State Technical University,  
Novosibirsk, Russia; Technical University of Sofia,  
Sofia, Bulgaria

*Abstract:* Derivation of signals is often required to control various dynamic objects [1–8]. Derivation allows increasing the stability of the system, since it allows to react not only to the actual increase in the control error, but also to take into account the tendency of growth or reduction of this error. Derivation increases the margin of stability in phase. There are methods of designing regulators based on multiple derivations. Some researchers categorically protest against this, pointing out that multiple derivations raises noise levels, other researchers argue that derivatives of arbitrarily high order are useful. Due to the development of digital technology, a general transition to digital control systems is inevitable, with total abandonment of analogue technology (except for ADC and DAC) for these purposes. In connection with this, it is important to study the causes of the generation of noise during multiple derivations and to estimate the level of these noises. This paper carries out these studies by modeling in the *VisSim* program, which, by its action algorithms, is identical to that of the digital controller.

*Key words:* digital regulators, signal processors, noise of derivation, modeling, *VisSim*

## REFERENCES

- [1] Performance evaluation of PID controller for automatic generation control in interconnected thermal system with reheat turbine in deregulated environment. 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI), 2015, DOI: 10.1109/KBEI.2015.7436221, Publisher: IEEE, Conference Location: Tehran, Iran. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7436221/?reload=true>
- [2] Vostrikov A. S. Problema sinteza reguljatorov dlja sistem avtomatiki: sostojanie i perspektivy // Avtometrija. 2010. T. 46. № 2. S.3–19.
- [3] Vostrikov A.S., Francuzova G.A. Sintez PID-reguljatorov dlja nelinejnyh nestacionarnyh ob#ektov // Avtometrija. 2015. T. 51. № 5. S. 53–60.
- [4] G.A. Francuzova, E.P. Kotova. Raschjot i issledovanie vozmozhnostej sistem avtomaticheskogo upravlenija s tipovym PID-reguljatorom i modifitsirovan-nym PI2D-reguljatorom. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2017. № 1 (19). S. 10–15.
- [5] Zhmud, V. A. Modelirovanie zamknutyh sistem avtomaticheskogo upravlenija: uchebnoe posobie dlja

akademicheskogo bakalavriata / V. A. Zhmud. – 2-e izd., ispr. i dop. – M.: Izdatel'stvo Jurajt, 2017. – 126 s. – (Bakalavr. Akademicheskij kurs). – ISBN 978-5-534-03410-3. URL: <http://urait.ru/catalog/403830>

- [6] V.A. Zhmud, V.A. Tajchenachev. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija vysshej tochnosti: ucheb. posobie, V.A. Zhmud, A.V. Tajchenachev; Novosib. Gos. un-t – Novosibirsk: IPC NGU, 2016. – 178 s.
- [7] S.V. Kamenskij, G.A. Francuzova, G.P. Chikil'din, V.A. Zhmud, A.S. Vostrikov, Ju.E. Voskobochnikov, E.A. Basynja, V.G. Trubin. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija, mehatroniki i robototehniki: monografija / kollektiv avtorov; pod obshhej redakciej G.A. Francuzovoj. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2017. – 210 s.
- [8] V A Zhmud, L V Dimitrov. The influence of the type of the test signal on the result of numerical optimization of regulators. . IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 803 (2017) 012186 doi:10.1088/1742-6596/803/1/012186. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012186/pdf>
- [9] V A Zhmud, I L Reva, L V Dimitrov. Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 803 (2017) 012185 doi:10.1088/1742-

6596/803/1/012185.

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012185/pdf>



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



**Любомир Ванков Димитров** – проректор Технического университета Софии (София, Болгария), доктор наук, профессор, почетный доктори НГТУ, автор более 200 научных статей. Область исследований: мехатроника, автоматика, микроэлектронные модули и системы и их применение (MEMS).  
E-mail: [lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg](mailto:lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg)