

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.11>

УДК: 621.317.6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ ОСНОВНОЙ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ С ПЕРЕХОДНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ ПОСРЕДСТВОМ НЕЛИНЕЙНОГО РЕКУРСИВНОГО ФИЛЬТРА ВТОРОГО ПОРЯДКА

К.М. Полторыхин<sup>1,2</sup>, Э.В. Семенов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН

634055, Томск, просп. Академический, 2/3

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2025 г.

**Аннотация.** Отмечено, что переходные характеристики реальных устройств основной полосы частот могут иметь сглаженный переход к крутой части фронта, что формально указывает на необходимость применения фильтра высокого порядка для моделирования таких переходных характеристик. Этот эффект сам по себе незначителен (переходная характеристика в целом удовлетворительно моделируется нелинейным фильтром второго порядка), однако показано, что он значительно увеличивает погрешность измерения характеристик моделирующего нелинейного фильтра. Предложено на входе нелинейного фильтра второго порядка дополнительно включить линейный фильтр Гаусса. Допустимость такого решения обусловлена тем, что участок максимальной невязки реальной переходной характеристики и переходной характеристики второго порядка является малосигнальным. На примере нелинейно-инерционной модели устройства оцифровки с верхней граничной частотой около 100 МГц показано, что такой прием позволяет уменьшить

погрешность измерения характеристик моделирующего нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка с 28 % до величин не более 1 %. При этом погрешность моделирования переходных характеристик устройства оцифровки уменьшается с 14 до 3 %.

**Ключевые слова:** нелинейно-инерционная модель, устройства основной полосы частот, модель типа «черный ящик», видеоимпульсные сигналы, характеристика устройств.

**Финансирование:** работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2024-0001).

**Автор для переписки:** Полторыхин Кирилл Михайлович, [kpoltorykhin@inbox.ru](mailto:kpoltorykhin@inbox.ru)

## Введение

Характеризация нелинейных устройств в основной полосе частот (до модулятора и после демодулятора), а также в видеоимпульсных системах, до настоящего времени оставалась проблематичной задачей. Модели, на которых основываются измерения и характеристика, либо не подходят для видеоимпульсного режима воздействия (модели на основе X-параметров) [1-3], либо имеют трансверсальную структуру, при помощи которой сложно описывать колебательные и экспоненциальные переходные процессы [4-6]. Для описания таких переходных процессов можно использовать нелинейные рекурсивные фильтры [7-8], но они имеют большое количество характеристических функций, которые сложно однозначно определить из экспериментов.

В настоящее время нами предложены достаточно простые нелинейно-инерционные модели в виде нелинейных рекурсивных фильтров разных порядков [9-11]. Однако их использование сдерживается тем, что характеристические функции в них определяются вариационными методами. При этом сложно указать погрешность их определения и рассматривать полученный результат как результат измерения. Для модели первого порядка был

разработан способ косвенного измерения нелинейных характеристик в упомянутых моделях [9], который заключается в измерении семейства переходных характеристик (ПХ) и стробировании сигналов в эквивалентной схеме устройства по окончании переходного процесса (для определения вольт-амперной (ВАХ) и кулон-вольтовой (КВХ) характеристик). Однако данный способ не подходит для моделей более высоких порядков (для случаев осциллирующих ПХ), когда одни элементы могут в среднем компенсировать инерционность других, что затрудняет независимое определение связанных с ними характеристических функций.

Характеризация по модели второго порядка требовала использования вариационного метода, который не позволяет метрологически корректно оценить погрешность измерения [11]. Однако это ограничение было преодолено разработанным способом измерения, в котором характеристики устройства измеряются отдельно в разные моменты времени переходного процесса [12].

Модель второго порядка в целом достаточно точно аппроксимирует переходные характеристики с выбросом на плоской вершине, даже если они имеют порядок выше второго. Наибольшая невязка модели второго порядка с измеренными ПХ наблюдается в самом начале переходного процесса. Крутизна ПХ второго порядка весьма быстро достигает максимальных значений, в то время как ПХ более высоких порядков являются сглаженными вместе с их производными. Такая невязка не имеет большого значения, если стробирование для определения характеристических функций выполняется по окончании переходных процессов в эквивалентной схеме устройства. Однако с переносом точек стробирования на фронт в соответствии с методом [12], погрешность измерения характеристических функций по нелинейно-инерционной модели второго порядка оказывается в сильной зависимости от отмеченной невязки.

В настоящей статье рассматривается способ уменьшения погрешности моделирования переходных характеристик высших порядков при сохранении второго порядка нелинейной части модели.

## 1. Пример переходной характеристики с выбросом на плоской вершине для реального устройства и варианты ее моделирования комбинацией фильтров различного порядка

На рис. 1а сплошной линией приведен пример ПХ типичного устройства основной полосы частот: устройства оцифровки National Instruments PXI-5114 (верхняя граничная частота около 100 МГц). Штриховой линией на рис. 1а приведена переходная характеристика линейного фильтра нижних частот (ФНЧ) второго порядка (рис. 2, параметры  $C = 32$  пФ,  $L = 35$  нГн,  $R = 46,9$  Ом) с подходящей частотой среза и добротностью (нелинейность осциллографа составляет десятые доли процентов [11], поэтому при рассмотрении формы ПХ в целом ее можно представить линейной моделью). Представленный на рис. 2 ФНЧ реализован как включенный шунтом двухполюсник со входом по току и выходом по напряжению. Это упрощает описание его передаточной характеристики.

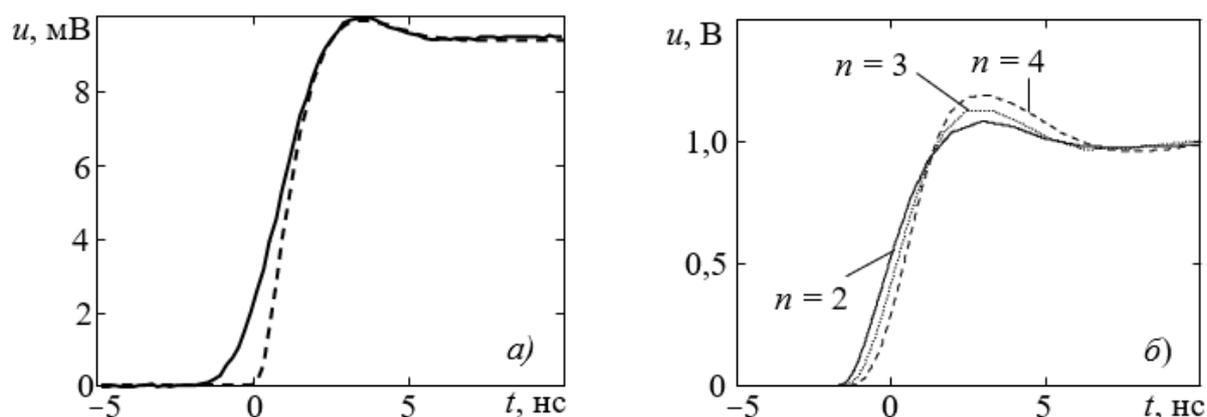


Рис. 1. Переходные характеристики: осциллографа National Instruments PXI-5114 (а, сплошная кривая), фильтра второго порядка (а, штриховая линия) и линейных фильтров Баттерворта различного порядка  $n$  (б).

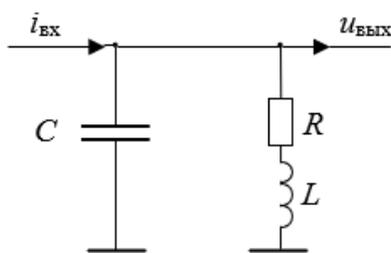


Рис. 2. Линейный фильтр второго порядка.

Можно видеть, что фронт и область осцилляций аппроксимируются удовлетворительно уже фильтром второго порядка, однако начальный участок переходного процесса моделируемого устройства (примерно  $-2...0$  нс) явно не соответствует примененной модели. Это обстоятельство будет вызывать существенную систематическую погрешность измерения характеристик исследуемого объекта в соответствии со способом [12]. Этот способ использует начальный участок ПХ для отдельного измерения характеристики емкостного элемента эквивалентной схемы объекта, поэтому важно минимизировать погрешность аппроксимации на данном участке.

На рис. 1б в качестве примера представлены переходные характеристики фильтра Баттерворта различного порядка. Можно заметить, что с повышением порядка фильтра растягивается (примерно до 2 нс) переход к наиболее быстрому участку фронта, что соответствует свойству измеренной ПХ объекта. Однако фильтр, моделирующий объект, строится как нелинейный и увеличение его порядка приведет к увеличению количества характеристических функций, что нежелательно.

Альтернативный способ моделирования ПХ объекта: сохранить второй порядок нелинейного фильтра, но добавить простой линейный фильтр, сглаживающий «излом» в начале переходной характеристики. Линейный характер этого дополнительного фильтра допустим в связи с тем, что начальный участок ПХ при любом уровне воздействия является малосигнальным. Простой характер перехода к крутому участку ПХ (без дополнительных осцилляций) указывает на то, что следует применить дополняющий фильтр с переходной характеристикой совершенно без выбросов. К таким фильтрам относится только фильтр Гаусса.

Передаточная характеристика фильтра Гаусса описывается следующим выражением:

$$H(\omega) = \exp[-(\omega\tau / 2)^2], \quad (1)$$

где  $\tau$  – постоянная времени фильтра Гаусса. Форма выходного сигнала  $u(t)$  такого фильтра получается, как результат обратного преобразования Фурье  $F^{-1}$  от произведения спектра входного сигнала на передаточную функцию фильтра Гаусса:

$$u(t) = F^{-1}\{F[x(t)]H(\omega)\}, \quad (2)$$

где  $x(t)$  – входной сигнал,  $F$  – прямое преобразование Фурье.

На рис. 3 представлено сравнение измеренной переходной характеристики осциллографа с модельной, когда к изображенному на рис. 2 ФНЧ добавляется фильтр Гаусса. При этом параметры в ФНЧ изменяются: емкость  $C = 30$  пФ,  $L = 37$  нГн, резистор  $R = 46,9$  Ом, постоянная времени фильтра Гаусса равна 1,2 нс. Можно видеть, что использование фильтра Гаусса позволило сгладить начальный участок и в целом адекватно промоделировать переходную характеристику осциллографа. В этом случае положение фильтра Гаусса на входе или на выходе основного фильтра второго порядка не будет влиять на результат моделирования, поскольку основной фильтр на данном этапе мы рассматриваем как линейный.

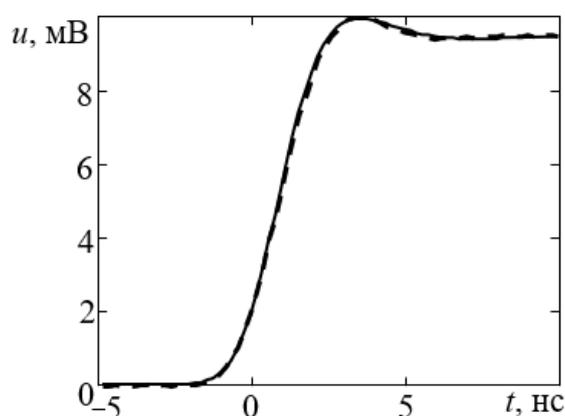


Рис. 3. Переходная характеристика осциллографа National Instruments PXI-5114 (сплошная кривая) и фильтра второго порядка с добавлением фильтра Гаусса (штриховая кривая).

## 2. Используемая нелинейно-инерционная модель для моделирования переходных характеристик с выбросом на плоской вершине

Существует ряд задач, когда нелинейность устройств, являясь малой по величине (доли процента), имеет весьма большое практическое значение (например, системах связи со сложными видами модуляции [13], в системах нелинейной рефлектометрии [14] и локации [15]). Характеризовать нелинейные устройства с выбросом на плоской вершине ПХ, по нашим предложениям, нужно с использованием модели в виде нелинейного рекурсивного фильтра нижних частот второго порядка [10]. Динамику работы этого фильтра можно пояснить эквивалентной схемой из конденсатора, параллельно которому присоединены последовательно включенные резистор и индуктивность (рис.4, а).

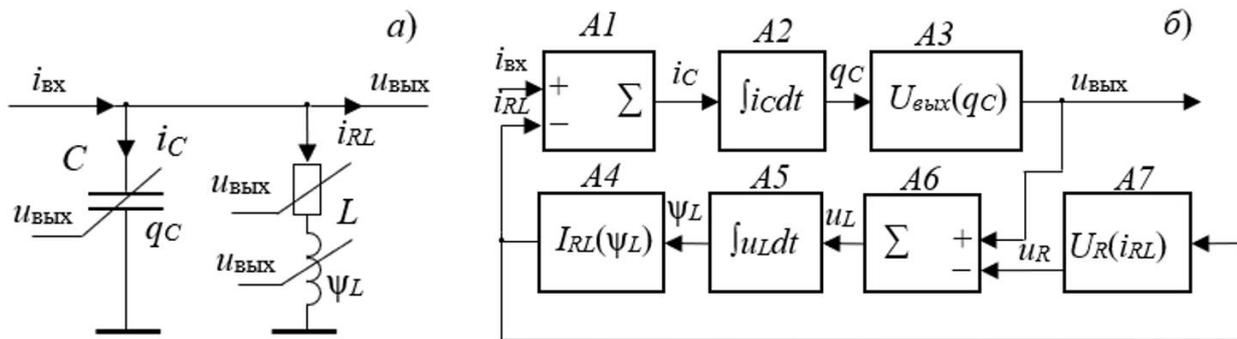


Рис. 4. Эквивалентная схема нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка (а) и ее структурная схема (б).

На вход модели подаются ступенчатые функции тока  $i_{вх}(t)$ . Если же входной сигнал является напряжением  $u_{вх}(t)$ , то ток вычисляется с учетом сопротивления подводящей линии  $\rho$ :

$$i_{вх}(t) = u_{вх}(t) / \rho. \quad (3)$$

Конденсатор в эквивалентной схеме отвечает за зависимость крутизны фронта переходной характеристики от входного сигнала. Резистор характеризует зависимость выходного сигнала от входного на плоской вершине переходной характеристики. Индуктивность влияет на выброс на плоской вершине переходной характеристики.

Согласно эквивалентной схеме, можно составить структурную схему фильтра (рис. 4б). На вход вычитателя  $A1$  подается входной сигнал в виде тока. Согласно первому закону Кирхгофа, ток, протекающий через емкость, будет находиться как разность между входным током и током, протекающим через последовательную RL-цепь. Напряжение на емкости является функцией заряда  $U_{\text{вых}}(q_C)$  (узел  $A3$ ), поэтому в модель добавлен интегратор  $A2$ , который позволяет найти заряд  $q_C$  путем интегрирования тока во времени.

По обратной связи напряжение на емкости  $u_{\text{вых}}$  подается на вычитатель  $A6$ , с помощью которого находится напряжение на индуктивности  $u_L$ . На этот же вычитатель подается напряжение на резисторе  $U_R(i_{RL})$  (узел  $A7$ ). Ток  $I_{RL}(\psi_L)$ , протекающий через RL-цепь, определяется как функция зависимости от магнитного потока  $\psi_L$ , который, в свою очередь, находится в узле  $A5$  путем интегрирования напряжения на индуктивности  $u_L$  во времени.

Для моделирования переходных характеристик используется система характеристических функций, которые получаются с помощью стробирования переходных характеристик: ампер-вольтовая характеристика (АВХ)  $U_R(i_{RL})$ , кулон-вольтовая характеристика (КВХ)  $U_{\text{вых}}(q_C)$  и вебер-амперная характеристика (ВБАХ)  $I_{RL}(\psi_L)$ .

### **3. Выбор места включения фильтра Гаусса (на входе или на выходе нелинейного рекурсивного фильтра)**

Для характеристики устройств основной полосы частот на основе нелинейно-инерционной модели второго порядка требуется определить характеристические функции: АВХ, КВХ и ВБАХ. Они находятся из измеренного семейства переходных характеристик устройства (рис. 5), на которых устанавливаются точки стробирования в разные моменты времени и безытерационно рассчитываются характеристические функции [12]. Для измерения АВХ точка стробирования устанавливается на плоской вершине переходной характеристики. Для измерения ВБАХ выбирается момент времени, когда выброс на плоской вершине имеет максимальное значение. Для измерения КВХ

точка стробирования устанавливается в точке максимальной крутизны фронта (на рис. 5 это 1,35 нс). При этом выбор данной точки не позволит охватить весь динамический диапазон объекта, поэтому на вход подаются тестовые воздействия, вызывающие перегрузку объекта на плоской вершине (рис. 5). Это позволит в точке стробирования на фронте получить КВХ по всем диапазонам выходных напряжений объекта [12].

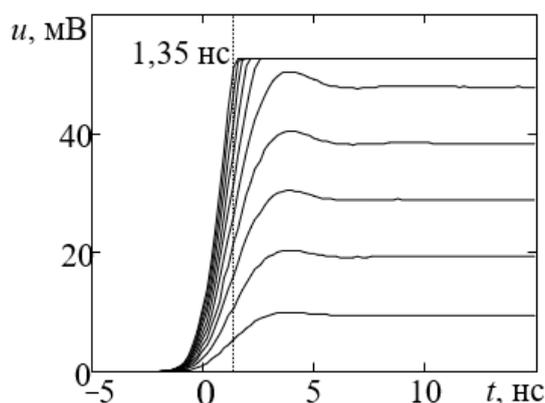


Рис. 5. Измеренные переходные характеристики осциллографа National Instruments PXI-5114.

При расположении фильтра Гаусса на входе нелинейного рекурсивного фильтра ток  $i_{\text{вх}}^*(t)$  на входе последнего вычисляется по формуле:

$$i_{\text{вх}}^*(t) = F^{-1}\{F[i_{\text{вх}}(t)]H(\omega)\}. \quad (3)$$

Поскольку АВХ (рис. 6) измеряется по плоским вершинам импульсов, то она не будет зависеть от положения фильтра Гаусса (на входе или выходе рекурсивного фильтра), так как сигнал на плоской вершине переходной характеристики в обоих случаях будет одинаков. Характеристика получается близкой к линейной, а ее наклон обусловлен сопротивлением подводящей линии.

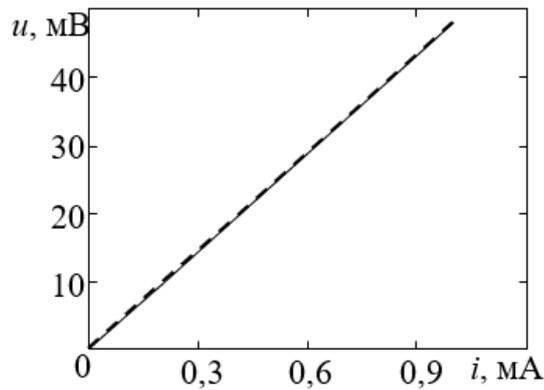


Рис. 6. Измеренная ампер-вольтовая характеристика осциллографа National Instruments PXI-5114 (сплошная кривая) и линейной модели (штриховая кривая).

Для представленного на рис. 5 семейства измеренных ПХ точка стробирования КВХ соответствует моменту времени 1,35 нс. При этом стоит отметить, что при отсутствии фильтра Гаусса на входе (рис. 1а), фронты измеренной и модельной ПХ явно отличаются. Это будет отчетливо заметно, если рассмотреть результат расчета тока и заряда емкости в эквивалентной схеме объекта (рис. 7): максимальный ток емкости при включении фильтра Гаусса уменьшается на 35 %, а заряд, наоборот, увеличивается на 17 % (из-за увеличения площади под кривой тока). Поэтому рассмотрим влияние места включения фильтра Гаусса на измерение КВХ.

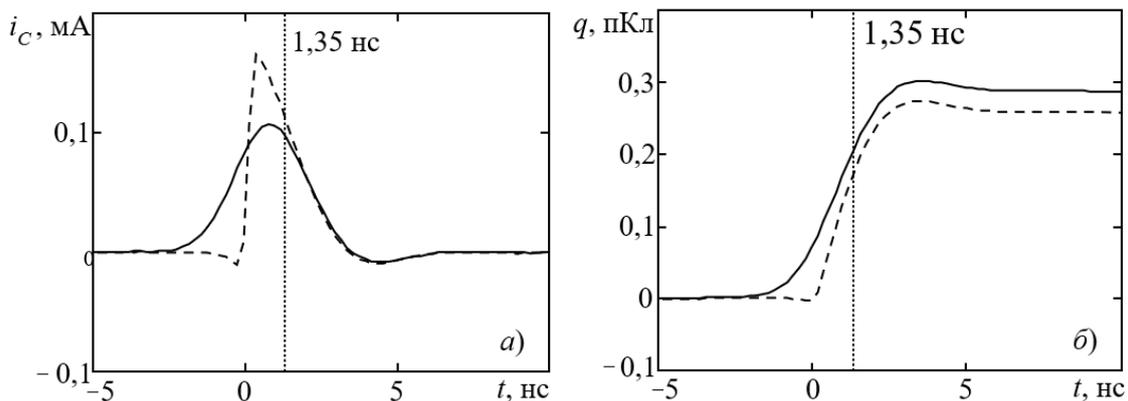


Рис. 7. Результат расчета тока (а) и заряда (б) конденсатора как функции времени из ПХ осциллографа National Instruments PXI-5114 при установлении фильтра Гаусса на входе рекурсивного фильтра (сплошные кривые) и без него (штриховые кривые).

Если установить фильтр Гаусса на выходе модели, то измеренное в эксперименте выходное напряжение объекта придется пересчитывать ко входу

фильтра Гаусса путем обращения передаточной функции (1). Такая задача в математическом смысле является некорректной. Кроме того, рекурсивный фильтр окажется под действием сигналов разрывного характера, что в общем случае провоцирует большие вычислительные погрешности. Поэтому будем включать фильтр Гаусса на входе рекурсивного фильтра.

#### 4. Влияние фильтра Гаусса на измерение характеристических функций модели

По модели, представленной на рис. 4б, находится заряд (рис. 7б) конденсатора эквивалентной схемы путем интегрирования тока емкости (рис. 7а) по времени, который находится как разница входного тока  $i_{вх}^*(t)$  (или  $i_{вх}(t)$ ), в зависимости от включения фильтра Гаусса) и тока RL-цепи  $i_{RL}(t)$ . Ток RL-цепи  $i_{RL}(t)$  по [12] находится с учетом приближения о значении индуктивности, которое принимается равным референсному (35 нГн без фильтра Гаусса на входе и 37 нГн с фильтром). Однако удобней рассматривать не заряд как функцию времени, а емкость как функцию времени (рис. 8), так как ее легко сравнить с референсными значениями (получено в разделе 1 в линейном приближении). Емкость при этом находится как отношение заряда емкости (рис. 7б) к напряжению на ней (рис. 5).

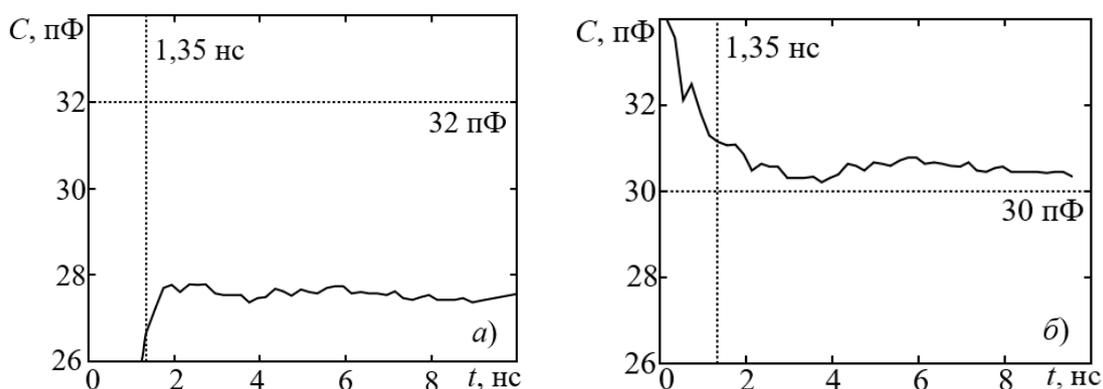


Рис. 8. Результат расчета емкости конденсатора как функции времени из малосигнальной ПХ осциллографа National Instruments PXI-5114 при установлении фильтра Гаусса на входе рекурсивного фильтра (а) и без него (б). Пунктирными линиями показаны референсные значения емкостей, полученные по линейной модели вариационным методом.

Референсные значения емкости (32 пФ без фильтра Гаусса и 30 пФ с фильтром) были получены по линейной модели (рис. 2) вариационным методом. Отклонение от референсного значения емкости при отсутствии фильтра Гаусса в момент времени 1,35 нс составило  $-20\%$  (рис. 8а). При включении фильтра Гаусса на входе нелинейно-инерционной модели погрешность составила  $1\%$  (рис. 8б). Такая погрешность уже является приемлемой и в целом характерна для поведенческих моделей.

На рис. 9 представлены получаемые КВХ без фильтра Гаусса (а) и с его включением на входе рекурсивного фильтра (б). Отличие КВХ от линейной КВХ емкости величиной 32 пФ (рис. 9а, пунктирная кривая) составило  $28\%$  без фильтра Гаусса. При включении фильтра Гаусса нелинейность КВХ достаточно мала, поэтому разница с референсной кривой визуально незаметна (рис. 9б). Невязка КВХ объекта измерения с линеаризованной на начальном участке мала ( $0,5\%$ ) и только в области больших сигналов увеличивается до  $2,0\%$ . Знак и величина нелинейности КВХ примерно соответствуют результатам измерения, приведенным в [11]. Это указывает на то, что оставшаяся невязка характеризует не методическую систематическую погрешность измерения, а нелинейность устройства.

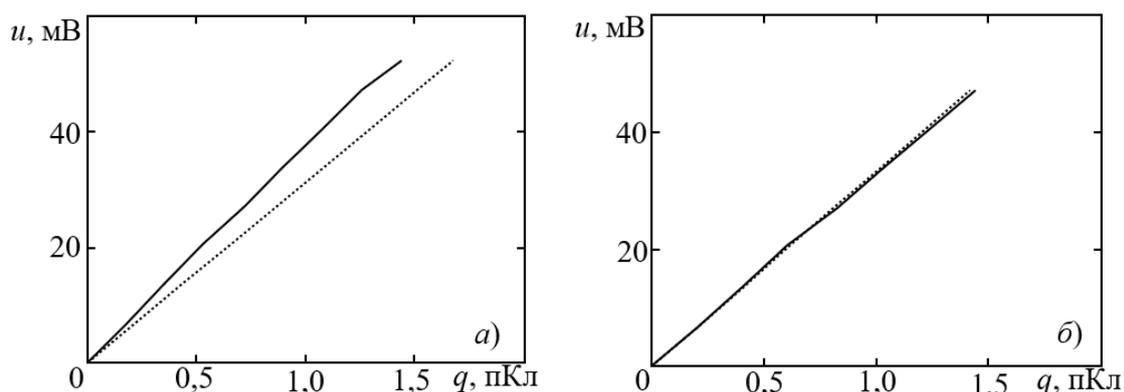


Рис. 9. Кулон-вольтовые характеристики без фильтра Гаусса на входе модели (а) и с подключенным фильтром Гаусса (б). Пунктирные кривые изображают характеристики линейной модели, представленной на рис. 4.

При известных АВХ и КВХ по остаточному принципу находится ВБАХ (рис. 10). Отличие ВБАХ объекта от ВБАХ линейной индуктивности

величиной 35 нГн (рис. 10а, пунктирная кривая) без фильтра Гаусса весьма велико и достигает 27 % (в том числе в области малых сигналов погрешность достигает 19 %). При включении фильтра Гаусса нелинейность ВБАХ, как и для КВХ, достаточно мала. На начальном участке отличие ВБАХ объекта (рис. 10б, сплошная кривая) от линейаризованной не превышает 0,05 %, что говорит о малой методической погрешности измерения. В области больших сигналов различие кривых возрастает и достигает 1,7 %. Данная величина также сопоставима с приведенной в [11] величиной нелинейности для этого же объекта, определенной вариационным методом. Это указывает на то, что оставшаяся на рис. 10б нелинейность в основном характеризует нелинейность объекта измерения.

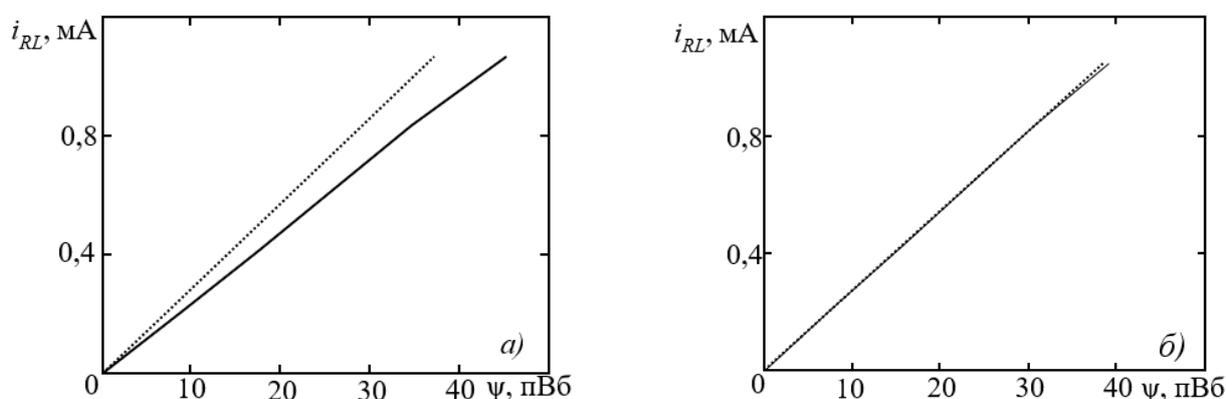


Рис. 10. Вебер-амперные характеристики без фильтра Гаусса на входе модели (а) и с подключенным фильтром Гаусса (б). Пунктирные кривые изображают характеристики линейной модели, представленной на рис. 2.

Подставив полученные характеристические функции в приведенную на рис. 4б модель, получим модельные переходные характеристики (рис. 11). ПХ для случая отсутствия фильтра Гаусса при характеристизации модели приведены пунктирными кривыми. Сплошные кривые показывают измеренные переходные характеристики. Погрешность моделирования для этого случая составляет 14 %. Модельные ПХ при использовании фильтра Гаусса изображены штриховыми кривыми. В этом случае погрешность моделирования уменьшается до 3 %. Уменьшение погрешности моделирования существенно и само по себе, но следует отметить также и качественное улучшение воспроизведения формы экспериментальных ПХ на модели.

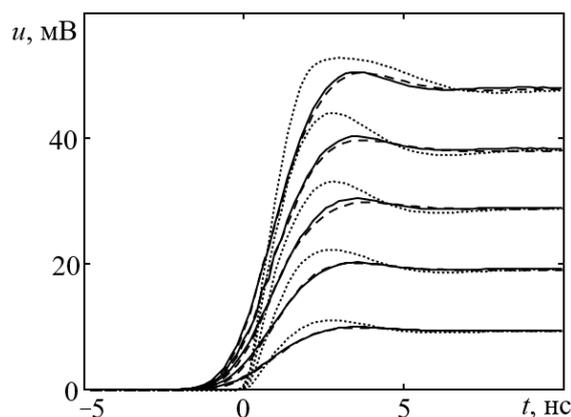


Рис. 11. Измеренные переходные характеристики осциллографа National Instruments PXI-5114 (сплошные кривые), смоделированные при использовании фильтра Гаусса (штриховые кривые) и без него (пунктирные кривые).

### Заключение

В работе показано, что при аппроксимации переходных характеристик устройств фильтрами ограниченного порядка основная невязка возникает в начальной части фронта – на реальных ПХ увеличение крутизны фронта происходит постепенно. Особенно это критично в задачах характеризации нелинейных моделей, где этот незначительный эффект увеличивает погрешность определения характеристических функций модели в виде нелинейного рекурсивного фильтра. Качество аппроксимации переходных характеристик можно улучшить посредством увеличения порядка нелинейного фильтра, но это приведет к увеличению количества характеристических функций. Поэтому был предложен способ, заключающийся в применении линейного фильтра Гаусса на входе нелинейной модели, который позволяет уменьшить погрешность моделирования и характеризации без увеличения порядка основного фильтра.

Показано, что включение фильтра Гаусса на входе нелинейной модели существенно уменьшает погрешность определения кулон-вольтовой и вебер-амперной характеристик (с 28 % до величин не более 1,7 %). Погрешность моделирования переходных характеристик объекта с использованием измеренных характеристических функций уменьшается с 14 до 3 % за счет дополнения модели фильтром Гаусса.

**Финансирование:** работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2024-0001).

### Литература

1. Root D. E., Wood J., Tuffillaro N., Schreurs D., Pekker A. Systematic Behavioral Modeling of Nonlinear Microwave/RF Circuits in the Time Domain Using Techniques from Nonlinear Dynamical Systems // Proc. of the 2002 IEEE Intern. Workshop on Behavioral Modeling and Simulation. Santa Rosa. 8 Oct, 2002. – P. 71–74. <https://doi.org/10.1109/BMAS.2002.1291060>.
2. Root D. E., Verspecht J., Sharrit D., Wood J., Cognata A. Broadband Poly-Harmonic Distortion (PHD) Behavioral Models from Fast Automated Simulations and Large-Signal Vectorial Network Measurements // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 2005. – Vol. 53, No. 11. – P. 3656–3664. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.855728>.
3. Odonyev O., Izhutkin V. Development of Broadband Transceiver Module for S-band Antenna Array using mathematical model of X-parameters: Transmission Path // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics. Moscow, Russia, 12-14 Mar. 2020. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/REEPE49198.2020.9059184>.
4. Лабутин С.А. Коррекция нелинейно-инерционных искажений импульсных сигналов в измерительных преобразователях // Техника средств связи. Сер.: Радиоизмерительная техника. – 1989. – Вып.1. – С.9-15.
5. Лабутин С. А. Оценивание и коррекция динамических искажений сигналов на основе нелинейных моделей средств измерений // Измерительная техника. Метрология. – 1986. – №12. – С.22–29.
6. Ланнэ А. А. Синтез нелинейных систем. Нерекурсивные системы, детерминированный случай // Электронное моделирование. – 1980. – №1. – С.60–68.

7. Sobhy M. I., Hosny E. A., Ng M. W. R., Bakkar E. A. Nonlinear System and Subsystem Modeling in the Domain // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1996. – vol. 44, No. 12. – P. 2571–2579. <https://doi.org/10.1109/22.554605>.
8. Pedro J. C., Maas S. A. A Comparative Overview of Microwave and Wireless Power-Amplifier Behavioral Modeling Approaches // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 2005. – vol. 53, No. 4. – P. 1150–1163. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.845723>.
9. Назаров М. А., Семенов Э. В. Минималистичная система характеристик нелинейных видеоимпульсных устройств и ее измерение // Изв. высших учебных заведений России. – 2023. – Т. 26, № 4. – С. 123–132. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-4-123-132>.
10. Semyonov E. V. Simple Behavioral Model of Baseband Pulse Devices in the Form of a Second-Order Nonlinear Recursive Filter // IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2021. – Vol. 68, No. 6. – P. 2192–2196. – <https://doi.org/10.1109/TCSII.2020.3048819>.
11. Назаров М. А. Анализ нелинейно-инерционных свойств устройств оцифровки с использованием их модели в виде нелинейного рекурсивного фильтра / М. А. Назаров, Э. В. Семенов // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 110–114. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2022-25-4-110-114>.
12. Полторыхин К.М., Семенов Э.В. Измерение нелинейных и динамических характеристик устройств основной полосы частот с выбросом на плоской вершине переходной характеристики // Изв. высших учебных заведений России. 2025. – Т. 28, № 4. – С. 109–118. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2025-28-4-109-118>.
13. Семенов Э.В. Моделирование влияния нелинейно-инерционных искажений в тракте основной полосы частоты цифровых систем связи на целостность сигнала// Сборник тезисов 10-й Научной конференции «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сочи, Научно-технологический университет «Сириус», 23-28 сентября 2024 г. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2024. – С. 159–160.

14. Артищев С.А., Семенов Э.В. Диагностика качества электрических контактов методом нелинейной видеоимпульсной рефлектометрии с учетом термоэлектрических эффектов // Известия вузов. Физика. – 2013. – № 9. – С. 60–65.
15. Semyonov E.V., Nazarov M.A., Berezin A.A., Fateev A.V. Features and behavioral modeling of ultra-wideband signals nonlinear scattering by small-sized electronic devices // IEEE Transactions on Radar Systems. – 2025. – vol. 3. – P. 843–851. <https://doi.org/10.1109/TRS.2025.3575462>.

**Для цитирования:**

Полторыхин К.М., Семенов Э.В. Моделирование нелинейных устройств основной полосы частот с переходными характеристиками высших порядков посредством нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.11>