

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Аннотация. Обоснована целесообразность создания многофункциональных аппаратно-программных комплексов для формирования и измерения параметров импульсных сигналов, сформулированы принципы их построения. Рассмотрены способы создания моделей сигналов для математического и схемотехнического моделирования измерительных электрических цепей.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, формирование, измерение, импульсный сигнал, модель сигнала.

Abstract. The expediency of creation of multipurpose hardware-software complexes for formation and measurement of parameters of pulse signals is proved, principles of their construction are formulated. Ways of creation of models of signals for mathematical and circuit modelling of measuring electric chains are considered.

Keywords: hardware-software complex, formation, measurement, pulse signal, signal model.

Введение

Проблема совершенствования средств формирования и измерения параметров импульсных сигналов, несмотря на свою многолетнюю историю, остается актуальной и в современных условиях, поскольку на первый план выдвигаются требования многофункциональности и гибкости таких средств, возможности их интегрирования в современные компьютеризованные информационно-измерительные системы. Этим требованиям отвечают аппаратно-программные комплексы, обеспечивающие автоматизированное программно управляемое формирование импульсных сигналов, измерение их параметров, обработку и представление результатов измерений, создание моделей сигналов. Из множества задач разработки таких комплексов в данной работе рассматриваются:

- определение параметров импульсного сигнала, оцифрованного аналого-цифровым преобразователем (АЦП);
- создание математической и Spice-моделей сигнала для моделирования измерительных электрических цепей;
- выбор частоты дискретизации цифроаналогового преобразователя (ЦАП) при формировании импульсов с минимально возможной (при данной аппаратурной реализации) длительностью фронтов.

1 Целесообразность создания и принципы построения аппаратно-программного комплекса для формирования и измерения параметров импульсных сигналов

Современные аппаратно-программные комплексы обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционным измерительным оборудованием.

Аппаратная часть комплекса обеспечивает автоматизированное программно управляемое формирование импульсных сигналов с помощью ЦАП

и измерение параметров сигналов, оцифрованных с помощью АЦП. Применение программно управляемых формирователей сигналов позволяет:

– предельно упростить аппаратную часть комплекса, избавиться от сложных и громоздких коммутирующих устройств и, тем самым, существенно уменьшить габариты устройства;

– значительно сократить время, необходимое для изменения режима работы;

– снять или ослабить ограничения по возможным вариациям формы, амплитуды и частоты следования сигналов;

– при формировании линейно изменяющихся напряжений снять проблему подбора опорных конденсаторов с малыми утечками и их коммутации при переключении диапазонов измерения с разными длительностями рабочих циклов.

Исследование импульсного сигнала, оцифрованного с помощью АЦП с высоким разрешением, позволяет по результатам одного эксперимента определить все интересующие пользователя параметры сигнала: амплитуду, период повторения импульсов, длительность фронта и спада, параметры апериодического или колебательного процесса установления напряжения (постоянную времени, амплитуду первого выброса, частоту затухающих колебаний) и др.

Рациональный выбор конфигурации аппаратной части и параметров используемых ЦАП и АЦП обуславливает многофункциональность комплекса, способность решения широкого круга измерительных задач при ограниченном и неизменном составе оборудования. Многофункциональность комплекса определяется также гибкостью его программного обеспечения. Оценка точностных характеристик исследуемых электрических цепей с учетом параметров реальных сигналов, а также множества факторов, характеризующих условия проведения эксперимента и неидеальность элементной базы, может быть получена в результате моделирования цепей и сигналов с применением математических и схемотехнических моделей и соответствующих программных средств.

Анализ требований, предъявляемых к аппаратно-программным комплексам для формирования, измерения параметров и моделирования импульсных сигналов, позволяет сформулировать принципы их построения:

1. Аппаратная реализация комплекса обеспечивает его многофункциональность путем программно управляемого изменения режимов работы при формировании и измерении параметров импульсных сигналов.

2. Программное обеспечение комплекса обеспечивает его гибкость и позволяет автоматизировать процессы подготовки и проведения измерительного эксперимента, математической обработки и представления результатов измерений, взаимодействия с аппаратной частью и пользователем.

3. Сопровождение подготовки и проведения измерительного эксперимента математическим и схемотехническим моделированием реальных сигналов в исследуемой цепи позволяет получить оценку ожидаемой погрешности измерения параметров этой цепи при выбранных условиях проведения эксперимента.

2 Виртуальный прибор для измерения параметров импульсных сигналов

Для измерения параметров импульсных сигналов разработан виртуальный прибор [1] на основе быстродействующего прецизионного модуля

PCI 5122 фирмы National Instruments (рис. 1). В настоящее время этот модуль является одним из лучших (по совокупности характеристик) среди устройств данного класса. Модуль позволяет производить выборку отсчетов с частотой 100 МГц при разрядности 14 бит, результат можно оценить визуально в программе NI Score или проанализировав массив отсчетов оцифрованного напряжения. Наличие собственного драйвера и программного обеспечения позволяет автоматизировать занесение полученных отсчетов в компьютер и выполнить их первоначальную обработку.



Рис. 1 Структура виртуального прибора для исследования импульсных сигналов

В качестве примера рассмотрим применение данного виртуального прибора для исследования выходного сигнала многофункциональной платы сбора данных NI PCI 6251, имеющей следующие паспортные динамические выходные параметры цифроаналогового канала:

- максимальная частота дискретизации 2,8 МГц;
- максимальная скорость нарастания выходного напряжения 20 В/мкс.

Данная плата использовалась для формирования последовательности прямоугольных импульсов положительной полярности с амплитудой 5 В, частотой следования от сотен герц до десятков килогерц и минимально возможной длительностью фронтов. На рис. 2 приведены полученные с помощью разработанного виртуального прибора временные диаграммы (в пределах длительности фронта импульса) выходного напряжения ЦАП платы при трех значениях частоты дискретизации: 2,8; 1,4; 0,7 МГц (период дискретизации соответственно равен 0,357; 0,714; 1,428 мкс). Высокое разрешение используемого виртуального прибора позволяет детально исследовать форму фронта импульса. В частности, из приведенных временных диаграмм видно, что искаженное воспроизведение формы фронта импульса наблюдается только в одном из трех приведенных случаев – при частоте дискретизации 0,7 МГц.

3 Определение параметров оцифрованного сигнала и создание его математической и Spice-моделей

Для определения параметров оцифрованного импульсного сигнала и создания математической модели, с приемлемой достоверностью воспроиз-

водящей его форму, в среде LabVIEW создана программа с использованием кусочно-нелинейной регрессии, выполняемой путем подбора параметров, заданных на локальных участках функций известного вида. В частности, для описания фронта импульсного сигнала, показанного на рис. 2, при частоте дискретизации 0,7 МГц можно выделить три фазы переходного процесса: начальный участок – возрастающее экспоненциальное напряжение, линейно изменяющееся напряжение и завершающий установление выходного напряжения ЦАП экспоненциальный участок. Для аппроксимации полученной реализации сигнала отдельно по каждому участку переходного процесса проводится автоматизированный поиск коэффициентов уравнений:

- для первого экспоненциального участка: $y_1(x) = a_1 e^{\tau_1 x}$;
- для второго линейного участка: $y_2(x) = kx + b_1$;
- для третьего экспоненциального участка: $y_3(x) = b_2 - \frac{1}{a_2 e^{\tau_2 x}}$,

где $y_1(x)$, $y_2(x)$, $y_3(x)$ – аппроксимирующие функции переменной x ; a_1 , a_2 , τ_1 , τ_2 – амплитуды и постоянные времени экспонент; b_1 , b_2 – постоянные составляющие; k – крутизна линейно изменяющейся составляющей.

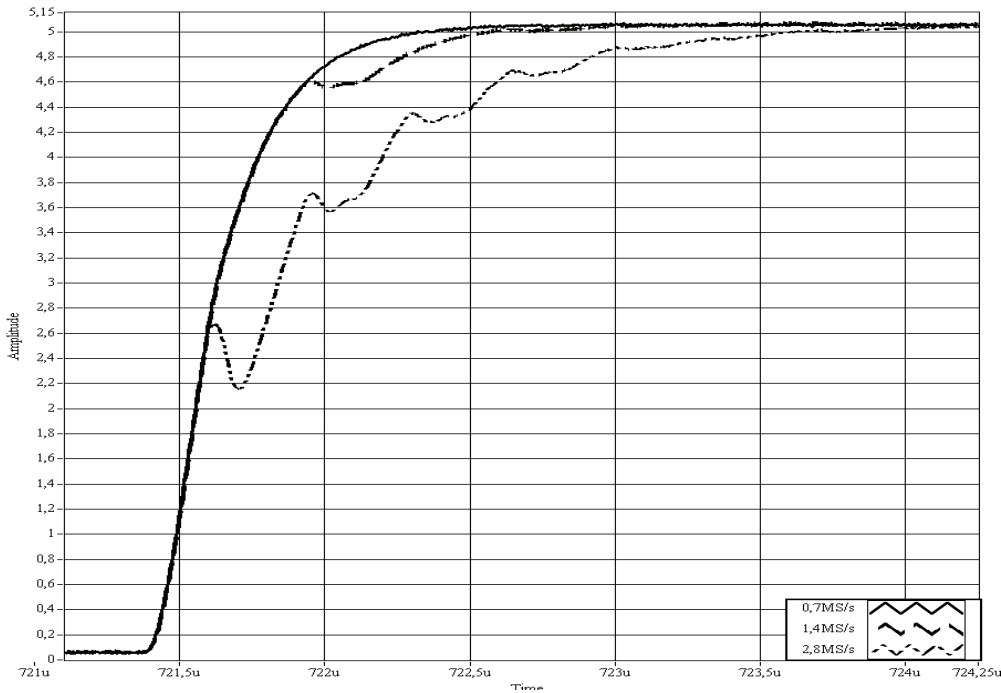


Рис. 2 Временные диаграммы выходного напряжения ЦАП при трех значениях частоты дискретизации: 2,8; 1,4; 0,7 МГц

Длительность аппроксимируемых участков и коэффициенты приведенных выше уравнений подбираются таким образом, чтобы первые производные полученных функций на границах участков были максимально близки. Таким образом, решается проблема обеспечения гладкости выходной аппроксимированной последовательности на границах ее локальных участков ап-

проксимации, что является преимуществом перед традиционными методами аппроксимации.

Для качественной оценки результата аппроксимации используется коэффициент детерминации (Adjusted R2), равный отношению дисперсии функции приближения к дисперсии данных.

На рис. 3 приведен фрагмент панели отображения результатов аппроксимации данных, полученных при оцифровке фронта импульсного сигнала при частоте дискретизации 0,7 МГц (программа LabVIEW).

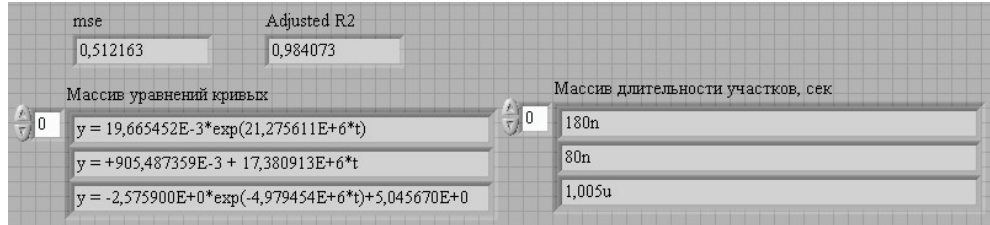


Рис. 3 Результаты аппроксимации данных, полученных при оцифровке фронта импульсного сигнала при частоте дискретизации 0,7 МГц

На рис. 4 приведены временные диаграммы записанного оцифрованного выходного сигнала ЦАП и аппроксимирующей его функции. Достигнутая сходимость экспериментальных данных и результатов математического моделирования сигнала может считаться удовлетворительной.

Результатом работы рассмотренной программы являются аналитические выражения для каждого из участков аппроксимации с указанием их длительности. Достоинством рассмотренного подхода является то, что параметры различных участков сигнала выражены в явном виде в коэффициентах уравнения, значения которых могут быть использованы для математического и схемотехнического моделирования устройств с моделью реального входного сигнала. Недостатком является отсутствие единого аналитического выражения, описывающего весь сигнал. Данный недостаток устраняется средствами тех программ, в которых ведется моделирование.

Например, математическая модель выходного напряжения ЦАП для моделирования измерительного преобразователя с применением программы математических расчетов MathCAD выглядит следующим образом:

$$t := 0, 0,0001 \cdot 10^{-6} .. 1,265 \cdot 10^{-6}$$

$$y(t) := \begin{cases} 19,6654 \cdot 10^{-3} \cdot \left(e^{21,2756 \cdot 10^6 t} \right) & \text{if } 0 \leq t \leq 0,18 \cdot 10^{-6} \\ \left[0,905487 + 17,3809 \cdot 10^6 \cdot (t - 0,18 \cdot 10^{-6}) \right] & \text{if } 0,18 \cdot 10^{-6} < t \leq 0,26 \cdot 10^{-6} \\ 5,04567 - 2,5759 \cdot e^{-4,979454 \cdot 10^6 (t - 0,26 \cdot 10^{-6})} & \text{if } 0,26 \cdot 10^{-6} < t \leq 1,265 \cdot 10^{-6} \end{cases}$$

Spice-модель оцифрованного импульсного сигнала для схемотехнического моделирования измерительных цепей с применением программ PSpice, OrCAD, MultiSim и т.п. может быть получена путем аппроксимации полученной осциллограммы сигнала имеющейся в этих программах кусочно-линейной функцией *PWL*. Для этого в среде LabVIEW создана программа, преобразующая массив с описанием оцифрованного сигнала в текстовый до-

кумент в формате входного языка Spice-совместимых программ моделирования. С учетом того, что количество точек модели сигнала, описываемого функцией *PWL*, в этих программах не должно превышать 3995 [2], устанавливается коэффициент прореживания и генерируется массив пар чисел: отсчет времени – отсчет напряжения. При этом задаются количество символов каждого числа и максимальная длина строки текстового описания модели сигнала.

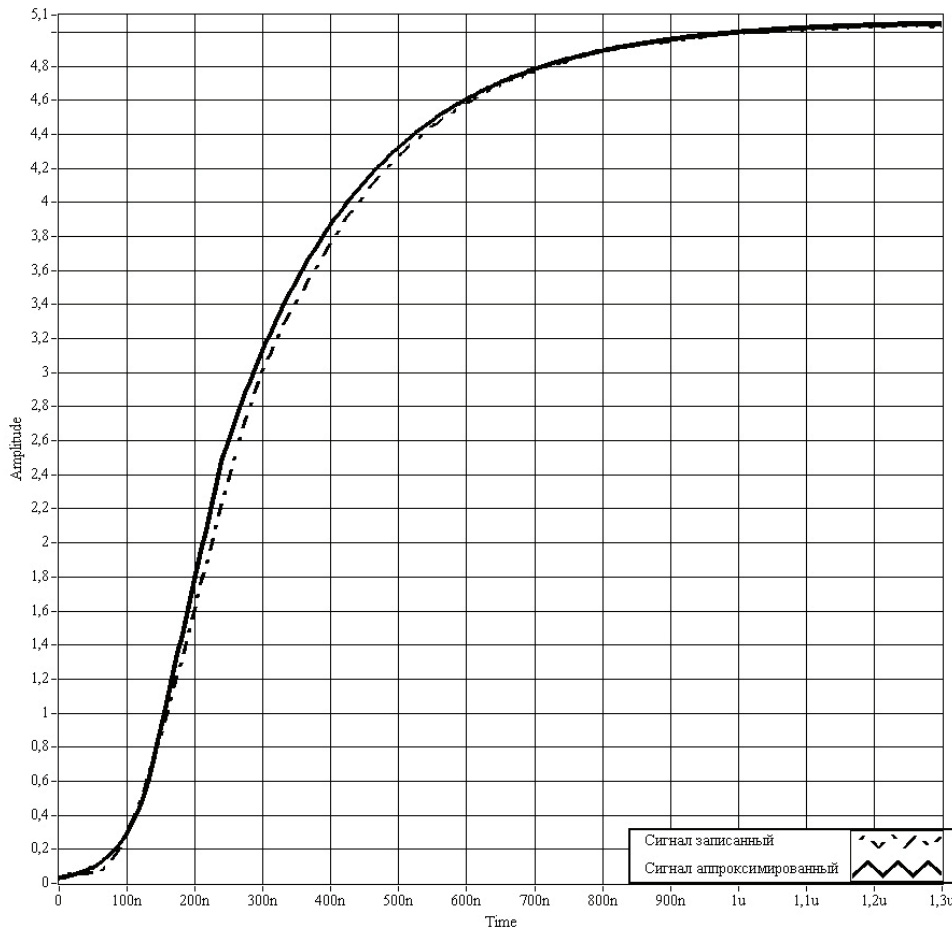


Рис. 4 Временные диаграммы записанного и аппроксимированного сигналов

4 Выбор частоты дискретизации ЦАП при формировании импульсов с минимально возможной длительностью фронтов

Построение формирователей сигналов сопровождается своими специфическими проблемами, обусловленными ограниченными разрядностью и частотой дискретизации ЦАП. Выбор частоты дискретизации ЦАП определяется формой выходных сигналов. При формировании синусоидальных, пилообразных и т.п. сигналов, скорость изменения во времени которых меньше максимальной скорости нарастания выходного напряжения ЦАП, целесообразно устанавливать максимально возможную частоту дискретизации. Точность воспроизведения заданной формы сигнала в этом случае будет определяться числом разрядов ЦАП. Более детального изучения требует проблема

формирования импульсов с минимально возможной (при данной аппаратурной реализации) длительностью фронтов.

В результате проведенных исследований условий получения минимально возможной длительности фронтов импульсов на выходе ЦАП установлено, что, поскольку реальная длительность фронтов импульсов, формируемых ЦАП, определяется максимальной скоростью нарастания его выходного напряжения, частота дискретизации ЦАП должна выбираться с учетом реального времени установления его выходного напряжения [2]. Например, из приведенных на рис. 2 временных диаграмм видно, что неискаженное воспроизведение формы фронта импульса наблюдается только в одном из трех приведенных случаев – при частоте дискретизации 0,7 МГц. При более высокой частоте дискретизации, когда период дискретизации меньше времени установления выходного напряжения ЦАП, наблюдаются выбросы (импульсные помехи) – крутые короткие всплески или провалы в выходном напряжении, возникающие во время смены значений входного кода за счет несинхронности размыкания и замыкания аналоговых ключей в разных разрядах ЦАП [3].

Возникновение импульсных помех является следствием борьбы разработчиков ЦАП за повышение их быстродействия путем уменьшения сглаживающих и корректирующих емкостей в их схемах. Максимальная амплитуда помехи наблюдается при переходе выходного напряжения через среднюю точку рабочего диапазона. Это происходит в момент переключения ключа самого старшего разряда (у 16-разрядных ЦАП при переходе от значения входного кода 0111 1111 1111 1111 к значению 1000 0000 0000 0000). В частности, если ключ старшего разряда откроется позже, чем закроются ключи младших разрядов, на выходе ЦАП должно будет установиться нулевое напряжение. Конечно, с учетом ограниченности скорости изменения выходного тока у ЦАП и выходного напряжения у операционного усилителя, включенного на его выходе, за малый интервал времени несинхронности работы ключей выходное напряжение не успеет уменьшиться до нуля. Однако возникающий провал в выходном напряжении существенно искажает форму импульса. На рис. 2 видно, что максимальную амплитуду имеет выброс при переходе через среднюю точку диапазона при скачке напряжения от 0 до 5 В. Выбросы, соответствующие моментам переключения младших разрядов, имеют меньшие амплитуды.

Приведенный пример показывает, что при формировании импульсов с минимально возможной длительностью фронтов период дискретизации должен быть больше времени установления выходного напряжения ЦАП.

Значение времени установления может быть взято из паспортных данных на используемый ЦАП. В частности, в упомянутой выше плате сбора данных М серии NI PCI 6251 применен ЦАП LTC1597 [4] совместно с операционным усилителем LT1468, что обеспечивает время установления менее 2 мкс при скачке напряжения на 10 В и точности поддержания постоянного уровня выходного напряжения – один младший значащий разряд (0,0015 %).

Проведенные исследования [1] позволили сделать вывод, что при выборе периода дискретизации ЦАП оценка времени установления его выходного напряжения по паспортным данным является чрезмерно завышенной.

Авторами предлагается методика оценки времени установления выходного напряжения ЦАП, позволяющая произвольно задавать допустимую по-

грешность установления напряжения, исходя из предположения, что на завершающем экспоненциальном участке этого процесса амплитуды выбросов (импульсных помех), обусловленных несинхронностью работы ключей младших разрядов, достаточно малы. Предлагаемая методика основана на следующих положениях.

1. Выходное напряжение ЦАП в пределах фронта прямоугольного импульса представляется математической моделью [5] в виде суммы линейно- и экспоненциально изменяющихся составляющих (рис. 5):

$$u(t) = \begin{cases} St, & \text{при } 0 < t \leq t_1 = \frac{U}{S} - \tau; \\ U - S\tau e^{-\frac{t-t_1}{\tau}}, & \text{при } t > t_1, \end{cases} \quad (1)$$

где U – амплитуда импульса; S – скорость нарастания линейно изменяющейся части фронта импульса; τ – постоянная времени его экспоненциально изменяющейся части.

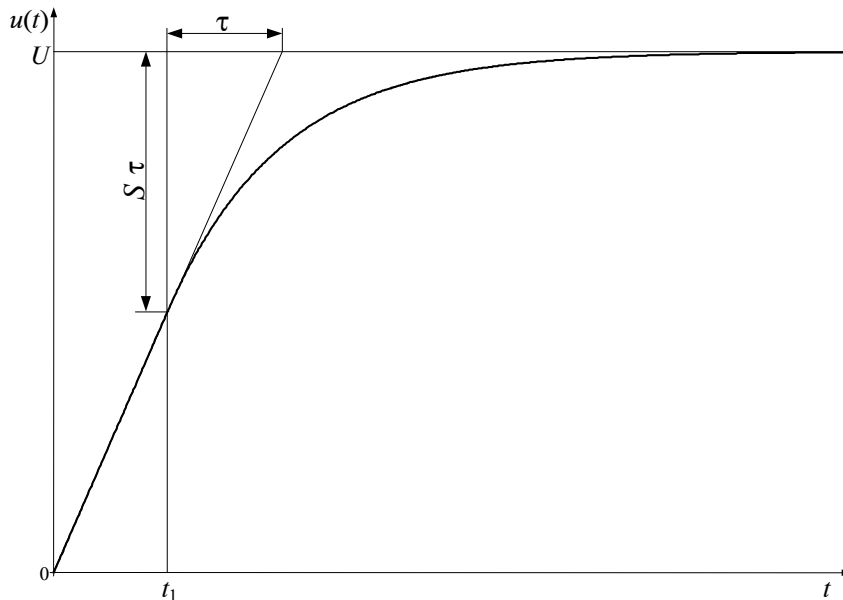


Рис. 5 К определению параметров моделируемого сигнала

Параметры S и τ могут быть определены экспериментально с помощью виртуального прибора, показанного на рис. 1.

2. Погрешность ϵ установления напряжения зависит от длительности этого процесса:

$$\epsilon(t) = \frac{u(t) - U}{U} = -\frac{S\tau}{U} e^{-\frac{t - \frac{U}{S} + \tau}{\tau}}. \quad (2)$$

3. Для установления напряжения с погрешностью, не превышающей заданного значения ϵ , требуется время t_ϵ , равное

$$t_{\varepsilon} = \frac{U}{S} - \tau - \tau \ln \left(\frac{\varepsilon U}{S\tau} \right). \quad (3)$$

В результате преобразований (3) получим расчетное соотношение:

$$t_{\varepsilon} = \frac{U}{S} - \tau(1 - 2,3 \lg \varepsilon) + 2,3 \tau \lg \left(\frac{S\tau}{U} \right). \quad (4)$$

На рис. 6 приведены зависимость погрешности ε установления напряжения от длительности t и зависимость времени t_{ε} установления напряжения от заданной погрешности ε . В расчетах по формулам (2) и (4) использованы упомянутые выше значения параметров, полученные при оцифровке фронта импульсного сигнала при частоте дискретизации 0,7 МГц (период дискретизации соответственно равен 1,428 мкс).

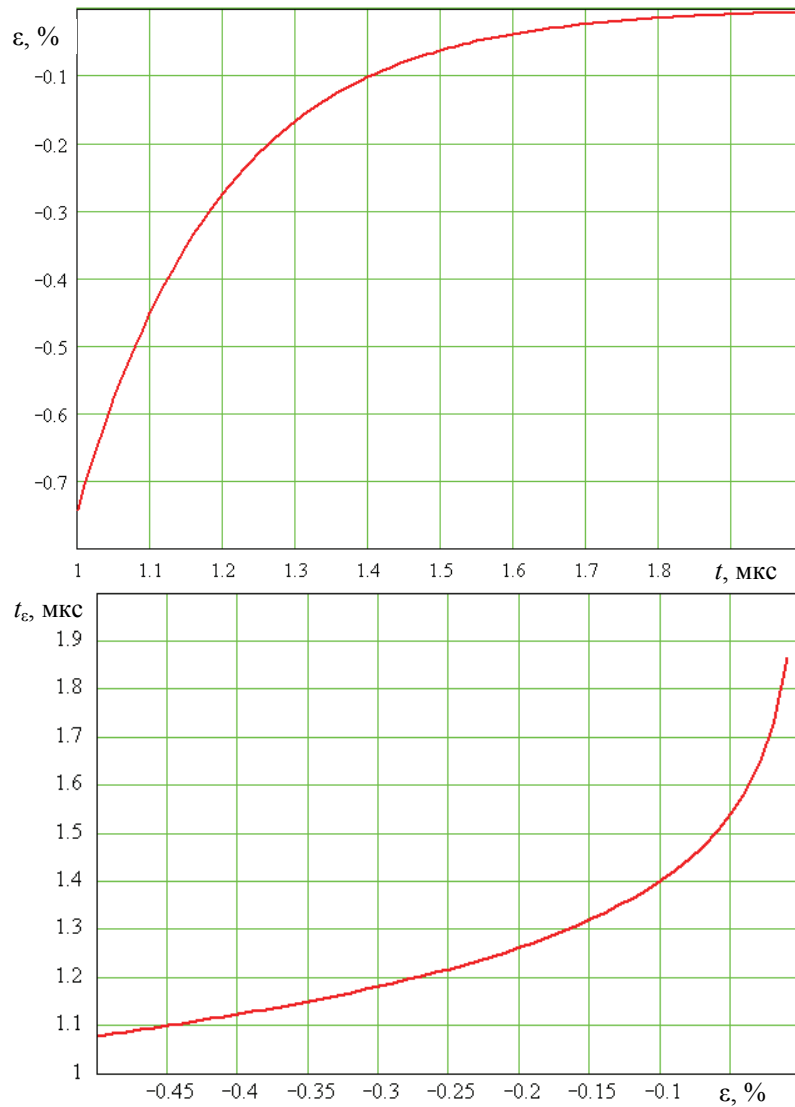


Рис. 6 К методике оценки времени установления выходного напряжения ЦАП

Из графиков на рис. 6, в частности, можно определить, что при $t = 1,4$ мкс (что приближенно равно значению периода дискретизации) погрешность установления напряжения $\varepsilon = 0,1\%$, что вполне приемлемо. Как было отмечено выше, по паспортным данным время установления выходного напряжения данного ЦАП составляет 2 мкс. Исследование, проведенное по предложенной авторами методике, показывает, что период дискретизации ЦАП следует выбирать не по паспортному значению его времени установления, а исходя из реальной ситуации, что позволит получить более высокое разрешение при воспроизведении формы импульсных сигналов.

Заключение

В отличие от традиционных приборов для генерирования импульсных сигналов и измерения их параметров, рассмотренный аппаратно-программный комплекс является многофункциональным средством измерений, позволяющим при сравнительно простой аппаратной реализации сформировать импульсный сигнал с минимальной для данной элементной базы длительностью фронтов, измерить реальные параметры импульсного сигнала и создать его модели, обеспечивающие хорошую сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных. Многофункциональность и гибкость комплекса обеспечивается программно управляемым изменением режимов его работы. Комплекс может найти применение в исследовательских лабораториях при разработке и оптимизации средств формирования и измерения параметров импульсных сигналов.

Список литературы

1. **Пучков, М. В.** Виртуальный прибор для исследования формирователей импульсных сигналов / М. В. Пучков, А. В. Светлов, И. В. Ушенина, П. Мишра // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Измерения-2008) : труды Междунар. научно-техн. конф. – Пенза : Информационно-издательский центр ПензГУ, 2008. – С. 105–108.
2. **Разевиг, В. Д.** Система проектирования OrCAD 9.2 / В. Д. Разевиг. – М. : СОЛОН-Р, 2001. – 520 с.
3. **Волович, Г. И.** Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. – М. : ДОДЭКА, 2007. – 528 с.
4. LTC1591/LTC1597. 14-Bit and 16-Bit Parallel Low Glitch Multiplying DACs with 4-Quadrant Resistors // Linear Technology Corporation. – 1630 McCarthy Blvd., Milpitas, CA 95035-7417. – LT 0507 REV A., 1998.
5. **Пучков, М. В.** Применение осциллографического модуля с высоким разрешением для создания Spice-модели импульсного сигнала / М. В. Пучков, А. В. Светлов, И. В. Ушенина., П. Мишра // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments : VI Междунар. научно-практ. конф. – М. : РУДН, 2007. – С. 150–153.

Паршуков Максим Юрьевич
аспирант, Пензенский
государственный университет

Parshukov Maxim Yuryevich
Post graduate Student,
Penza State University

E-mail: retch@pnzgu.ru

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем, Пензенский
государственный университет

E-mail: retch@pnzgu.ru

Svetlov Anatoly Vilevich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of radio
engineering and radio-electronic systems,
Penza State University

Ханин Илья Владимирович

аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: retch@pnzgu.ru

Khanin Ilya Vladimirovich

Post graduate Student,
Penza State University

Пураджит Мишра

аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: retch@pnzgu.ru

Puradzhit Mishra

Post graduate Student,
Penza State University

УДК 621.3: 681.3

Паршуков, М. Ю.

Принципы построения аппаратно-программных комплексов для формирования и измерения параметров импульсных сигналов / М. Ю. Паршуков, А. В. Светлов, И. В. Ханин, П. Мишра // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 3 (11). – С. 102–112.