

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ДИСКРИМИНАТОРА С ПОСТОЯННЫМ ПОРОГОМ И АМПЛИТУДНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ

© 2019 г. В. Беспалько<sup>a,\*</sup>, И. Бурак<sup>a</sup>, К. Салминыш<sup>b,\*\*</sup>

<sup>a</sup> Institute of Electronics and Computer Science  
14 Dzerbenes St., LV-1006, Riga, Latvia

<sup>b</sup> Institute of Astronomy, University of Latvia  
Raina boulevard, LV-1586, Riga, Latvia

\*e-mail: bezpalko@edi.lv

\*\*e-mail: kalvis.salmins@lu.lv

Поступила в редакцию 07.03.2019 г.

После доработки 09.05.2019 г.

Принята к публикации 15.05.2019 г.

При регистрации моментов событий существует задача формирования временных отметок, независимых от амплитуды выходных импульсов сенсоров. Показано, что для оценки точности формирования временных отметок (time walk) могут быть использованы скоростные генераторы сигналов произвольной формы и прецизионные измерители времени широкого применения. При этом погрешность оценки не превышает 0.2 пс. Эффективность методики продемонстрирована на примере дискриминатора с постоянным порогом. Предложенный вариант дискриминатора, дополненный измерителем амплитуды и амплитудной коррекцией, имеет точность временной привязки 17 пс.

DOI: 10.1134/S0032816219060028

### ВВЕДЕНИЕ

В физическом эксперименте широко распространены измерения, связанные с регистрацией моментов событий. События регистрируются сенсорами, импульсный выходной сигнал которых обычно имеет значительный разброс амплитуд. Это характерно, например, для таких сенсоров, как скоростные фотоумножители (ф.э.у.). Поэтому при проведении временных измерений возникает задача временной привязки, т.е. получения временных отметок, независимых от амплитуды импульсов.

Эту задачу решают формователи временных отметок *TSS* (Time Stamp Shaper), в качестве которых обычно используются аналоговые дискриминаторы постоянной фракции *CFD* (Constant Fraction Discriminator) [1]. Точность временной привязки (time walk) для различных вариантов таких схем лежит в пределах 25–50 пс [2–4]. В качестве альтернативы *CFD* могут выступать дискриминаторы с постоянным порогом *LED* (Leading Edge Discriminator) [5, 6]. Главным достоинством таких дискриминаторов является простота реализации, а основной недостаток заключается в низкой точности, обусловленной выраженной корреляцией между задержкой выходного сигнала дискриминатора и амплитудой импульса на его входе (walk-effect).

Указанный недостаток устраним, если определена данная корреляционная связь и осуществляется измерение амплитуды входных импульсов. На этой основе реализуется амплитудная коррекция результатов измерений в on line [7] или off line [8] режимах, которая позволяет обеспечить пикосекундную точность временной привязки. Однако методы оценки такой точности практически не разработаны, особенно когда речь идет об использовании измерительной аппаратуры широкого применения.

Задача данной работы – разработка такой методики и демонстрация ее возможностей на примере оценки точности формователя временных отметок на основе *LED* с амплитудной коррекцией.

### ФОРМИРОВАТЕЛЬ ВРЕМЕННЫХ ОТМЕТОК НА ОСНОВЕ ДИСКРИМИНАТОРА С ПОСТОЯННЫМ ПОРОГОМ

Во многих экспериментах для повышения соотношения сигнал/шум необходимо регистрировать только те сигналы, которые попадают в заданное временное окно (window), поэтому первым элементом формователя временных отметок *TSS* является временной селектор *Sel* (рис. 1).

При прохождении импульса ф.э.у. через селектор важно сохранить крутизну его фронта, что

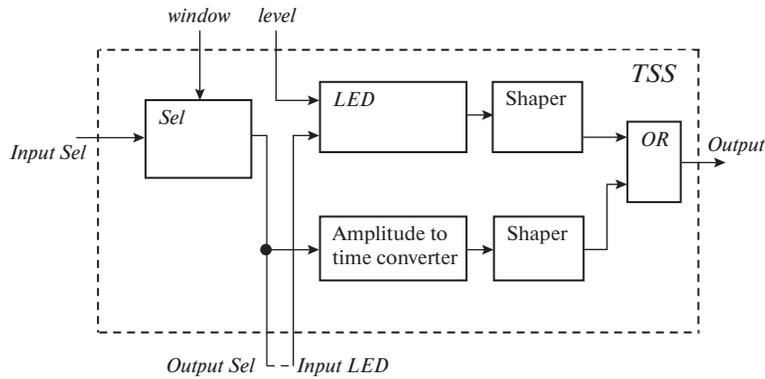


Рис. 1. Блок-схема формирователя временных отметок.

обеспечивает минимум джиттера задержки *LED*. В предлагаемом *TSS* временную селекцию реализует скоростной операционный усилитель *OU* LMH6703, имеющий специальную функцию отключения выхода (рис. 2). Для реализации селекции на вход управления выходом усилителя (контакт 8 *OU*) поступает сигнал *Window*, прошедший компаратор *K*.

Усилитель имеет широкую полосу усиления как малого сигнала (1.8 ГГц), так и большого (1.2 ГГц) и позволяет передать фронт импульса длительностью от 0.5 нс при перепаде 2 В. Задержка включения/выключения выхода ( $\leq 10$  нс) и диапазон выходных амплитуд усилителя (до  $\pm 3$  В) вполне достаточны для реализации временной селекции. Принципиальным недостатком селекторов аналогового сигнала является наличие глитчей – паразитных сигналов на выходе селектора в моменты появления фронтов временного окна. Паспортное значение глитча *OULMH6703B*

составляет 50 мВ, однако в предлагаемой схемотехнической реализации, благодаря дополнительному отрицательному току в цепи обратной связи (через резистор  $R_6$  от отрицательного источника напряжения), удалось полностью исключить глитчи отрицательной полярности.

Прошедшие временную селекцию импульсы поступают (см. рис. 1) как на пороговый дискриминатор *LED*, так и на преобразователь амплитуда–время *ATC* (Amplitude to Time Converter). В качестве *LED* использован скоростной компаратор ADCMP561, который реагирует на импульсы длительностью от 0.7 нс. Уровень дискриминации (*level*) обычно стараются установить как можно ближе к нулевому уровню, но выше уровня шумов. Преобразователь амплитуды коротких импульсов во временной интервал *ATC* построен по принципу пикового детектора с временной растяжкой и подробно описан в [9]. Нормированные по длительности с помощью формирователей *Shaper* импульсы с *LED* и с *ATC* поступают через схему *OR* (*ИЛИ*) на выход *TSS*.

Из принципа работы *LED* с постоянным порогом следует, что задержка момента его срабатывания существенно зависит от амплитуды входного сигнала. Этот эффект можно скорректировать, если известна амплитуда импульса и установлена корреляционная связь между амплитудой и задержкой дискриминатора [7, 8]. Для выявления этой корреляционной связи необходима предварительная калибровка. Наиболее корректно это делать в условиях реального эксперимента с использованием конкретного сенсора. В частности, это возможно в экспериментах, связанных с измерением временных интервалов между инициализирующими и вторичными световыми импульсами (например, в системах импульсной лазерной локации можно провести калибровку при локации неподвижной мишени и вариациях в широких пределах интенсивности отраженных сигналов). В этом случае есть преимущество, что возможна коррекция не только задержек *LED*, но

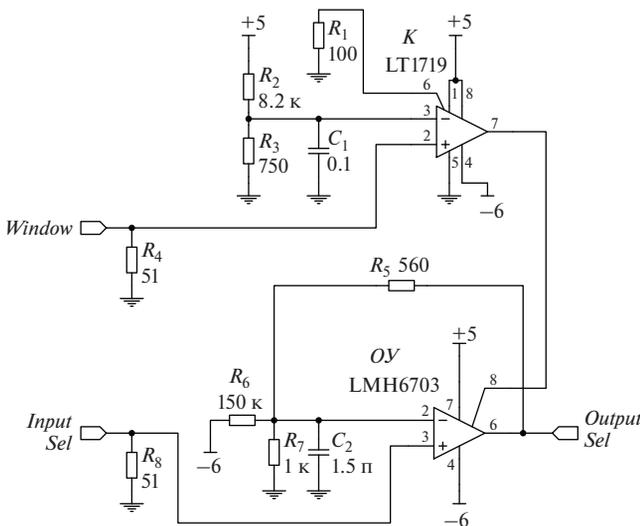


Рис. 2. Принципиальная схема блока *Sel*.

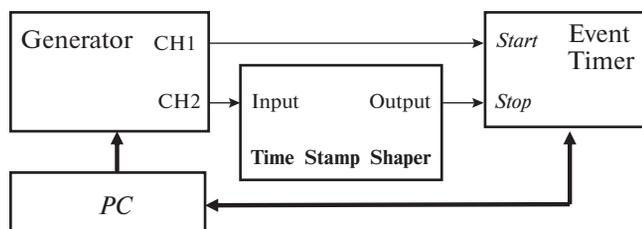


Рис. 3. Организация измерений для оценки точности формирователя временных отметок.

и влияния других, различных по своей природе связей между амплитудой сигнала и задержками измерительного тракта. Эти данные служат основой для определения корректирующей функции, по которой в дальнейшем в режиме off line осуществляется коррекция результатов измерения. В работе [10] подробно освещены аспекты построения корректирующей функции с учетом погрешностей измерения как временных интервалов, так и амплитуды импульсов.

#### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ФОРМИРОВАТЕЛЯ ВРЕМЕННЫХ ОТМЕТОК

В рамках реального эксперимента провести оценку точности  $TSS$  невозможно из-за высокого уровня шумов всего измерительного тракта. Поэтому в данной работе акцент делается на оценку точности при условии имитации реальных сигналов сенсора малошумящей аппаратурой. Методика базируется на измерениях фиксированного интервала времени, задаваемого импульсами  $Start$  и  $Stop$  (рис. 3) при условии изменения амплитуды стоповых сигналов в рабочем диапазоне. При этом точность временной привязки (time walk) оценивается как максимальный разброс результатов измерений временных интервалов в условиях изменения амплитуды стоповых сигналов.

Такая схема измерений известна [11], но предполагает использование узкоспециализированной уникальной аппаратуры. В данной работе предлагается использование современной аппаратуры широкого применения. Так генерация импульсов  $Start$  и  $Stop$  осуществляется двухканальным генератором, амплитуда выходных импульсов которого может изменяться в широком диапазоне, а измерение временных интервалов — прецизионным таймером событий, который способен обеспечить непрерывную регистрацию большого числа интервалов времени.

Методика предполагает накопление массива из  $n$  результатов измерений временных интервалов  $P_{ij}$  для установленного значения амплитуды  $A_j$  стопового импульса. Одновременно измеряются амплитуды  $A_{ij}$  стоповых импульсов и проводится коррекция результатов измерений  $P_{ij}$ , в резуль-

тате чего формируется массив скорректированных результатов измерений  $P_{cij}$ . Каждый  $i$ -й результат измерения в массиве содержит как случайную шумовую составляющую (определяется джиттером генерируемого временного интервала, погрешностью измерителя временных интервалов и собственными шумами  $FSS$ ), так и составляющую, которая зависит от амплитуды  $A_j$ .

Для уменьшения влияния шумов вычисляются оценки средних по массивам значений  $M[P_j]$  и  $M[P_{cj}]$ . Проведя такие измерения для всех значений  $A_j$  из рабочего диапазона амплитуд, можно определить разность между максимальным и минимальным средними значениями  $\max M[P_c] - \min M[P_c]$ , которая собственно и дает значение точности привязки. В идеале величина  $M[P_{cj}]$  не должна зависеть от амплитуды сигнала  $A_j$ , однако реально какая-то остаточная зависимость имеет место и характеризует точность работы  $FSS$ . Соответственно диапазон изменения величин  $M[P_j]$  дает значение точности привязки  $LED$  без использования амплитудной коррекции. Ввиду наличия шумов средние значения  $M[P_j]$  и  $M[P_{cj}]$  будут определяться с определенной погрешностью, общепринятая оценка которой зависит от дисперсии результатов измерения  $D[P]$  и уменьшается при увеличении числа испытаний  $n$ :

$$\pm 3\sqrt{D[P]}/\sqrt{n}. \quad (1)$$

Исходя из прецизионности применяемой аппаратуры и приемлемого числа испытаний, это соотношение позволяет определить погрешность предлагаемой методики.

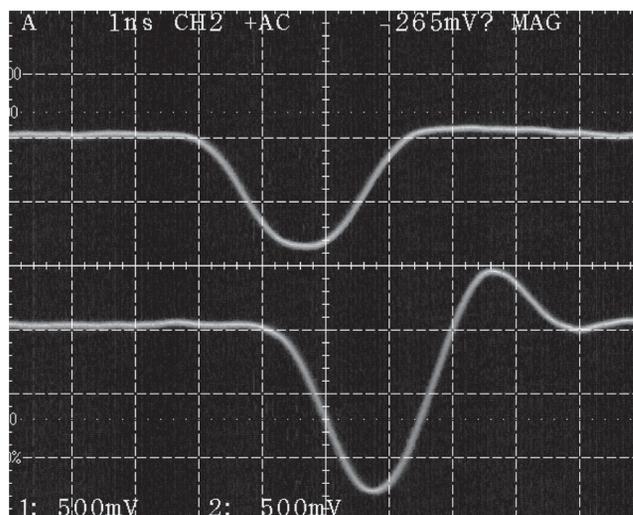


Рис. 4. Выходной импульс генератора WS8352 в режиме "fast" до (верхняя осциллограмма) и после прохождения через блок  $Sel$  (нижняя осциллограмма). Вертикальная шкала — 500 мВ/деление, горизонтальная — 1 нс/деление.

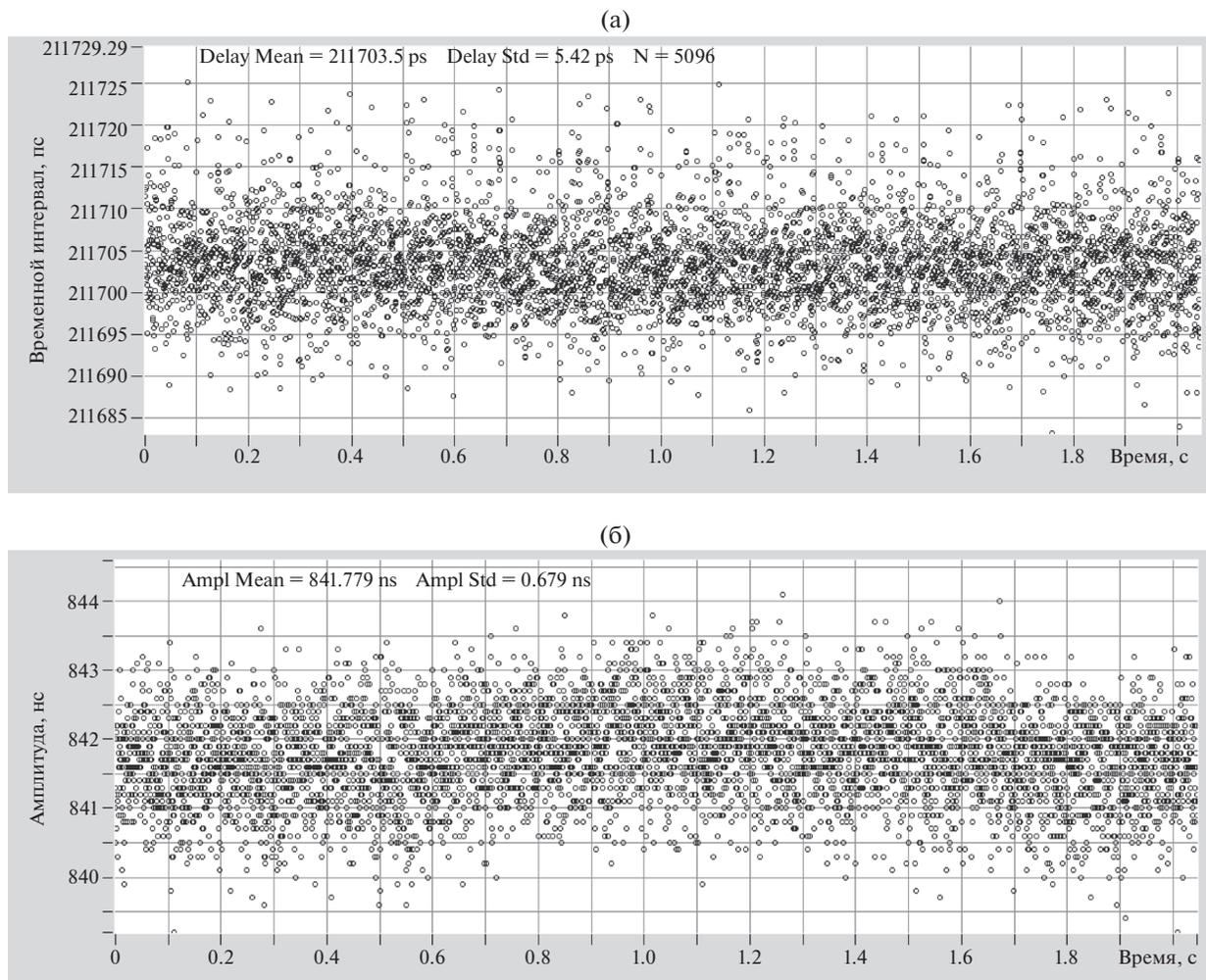


Рис. 5. Результаты измерения: а – фиксированного временного интервала при условии фиксированной амплитуды сигнала *Stop* и б – амплитуды этого сигнала.

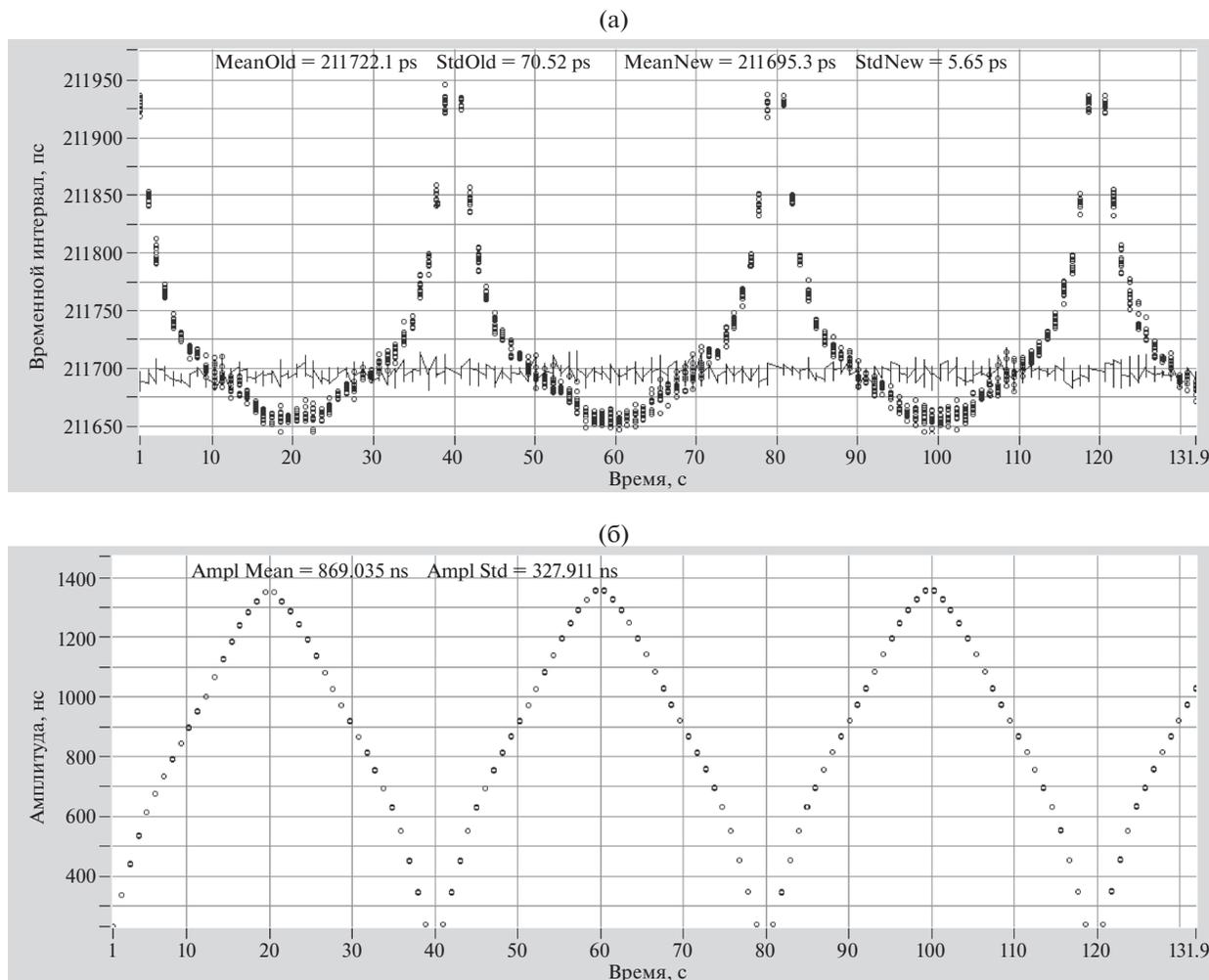
Методика и аппаратура применимы для оценки точности не только *LED* с амплитудной коррекцией (это наиболее сложный вариант), но и любого формирователя временной отметки, где точность будет определяться разностью  $\max M[P] - \min M[P]$ .

### ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЕ

**Первое требование** к измерительной аппаратуре состоит в том, что стоповые сигналы по своим параметрам должны быть подобны импульсам с выхода скоростного ф.э.у. Многочисленные публикации показывают, что форма усиленных импульсов ф.э.у. характеризуется фронтом 1–2 нс, длительностью 2–4 нс и диапазоном амплитуд от десятков милливольт до 1.5–2 В [12]. Современные скоростные генераторы сигналов произвольной формы на основе *DDS* (Direct Digital Synthesis) позволяют генерировать импульсы с такими

параметрами. В частности, это двухканальные генераторы AFG3252 (и его новая, более скоростная модификация AFG31252) фирмы Tektronix а также генератор WS8352 фирмы Tabor Electronics Ltd. На рис. 4 показана осциллограмма выходного импульса генератора WS8352 в режиме *fast* (амплитуда импульса 850 мВ, фронт 1 нс и ширина 3 нс).

**Второе требование** – малые шумы генератора и малая погрешность измерителя. Применимость указанных выше генераторов на основе *DDS* ограничена тем, что кратковременная нестабильность (сейчас принято использовать термин джиттер) генерируемого временного интервала (межканальной задержки) неспецифицирована, имеет довольно сложную зависимость как от величины временного интервала, так и от частоты их следования и достигает минимума при кратности величины временного интервала тактовому периоду генератора. Поэтому при тестировании измерялись временные интервалы длительностью 200 нс



**Рис. 6.** Результаты калибровочных испытаний: **а** — результаты измерения временных интервалов до (жирные линии) и после (тонкие линии) коррекции; **б** — результаты измерения амплитуды импульса *Stop*. Амплитуды импульсов задавались в диапазоне от  $-0.1$  до  $-2$  В с шагом  $0.1$  В. Длительность временных интервалов  $200$  нс, частота следования  $2.5$  кГц.

с частотой следования  $2.5$  кГц. Генерируемые импульсы *Start* и *Stop* имели ширину  $3$  нс, и их амплитуда могла быть задана в пределах от нескольких милливольт до  $2$  В. В качестве измерителя использовался прецизионный таймер событий A033 [13] фирмы Eventech, имеющий погрешность измерения интервала времени  $2.5$  пс.

На рис. 5а представлены результаты измерений временных интервалов по схеме на рис. 3 для случая фиксированной амплитуды стопового импульса  $-1.0$  В. Результаты показывают, что дисперсия результатов измерения при использовании данной аппаратуры составляет  $D[P] = 5.42^2 = 30$  пс<sup>2</sup>, что при числе испытаний  $n = 5096$  задает погрешность методики, согласно (1), на уровне  $0.2$  пс.

Результаты измерения амплитуды стоповых импульсов, представленные на рис. 5б, показывают, что амплитуда импульса величиной  $-1.0$  В

конвертируется во временной интервал длительностью около  $840$  нс, точность измерения которого составляет  $0.7$  нс среднего квадратичного отклонения (с.к.о.).

Таймер событий функционально представляет собой прецизионный регистратор моментов входных событий и позволяет проводить непрерывные измерения временных интервалов, поэтому графики на рис. 5 представляют собой развертку результатов измерения временных интервалов во времени (есть определенная аналогия с цифровым осциллографом, только в качестве сигнала здесь выступают интервалы времени). Это значительно более информативные измерения (позволяют, например, исследовать введенную или паразитную модуляцию временных интервалов) по сравнению с традиционной аппаратурой типа многоканальных измерителей интервалов времени, где результаты измерений представляются в виде гистограмм распределений.

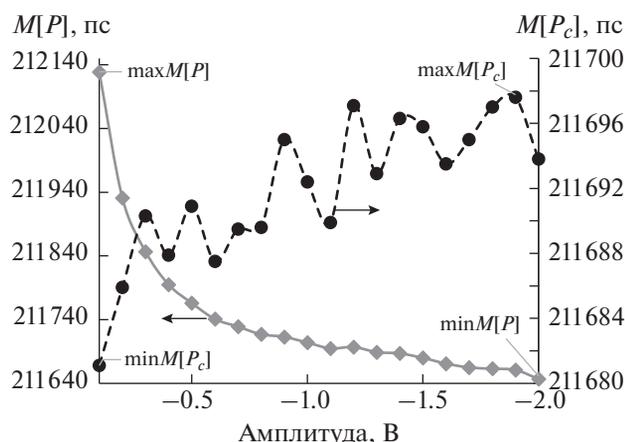


Рис. 7. Зависимости среднего значения временных интервалов  $M[P]$  (сплошная линия) и среднего значения скорректированных временных интервалов  $M[P_c]$  (штриховая линия) от амплитуды сигнала  $A$ .

**Третье требование** — для проведения калибровки с имитационными сигналами необходимо программное согласованное взаимодействие генератора, имитирующего сигналы ф.э.у., и прецизионного измерителя временных интервалов. Применяемая аппаратура допускает организацию такого взаимодействия, так как имеет программное управление от персонального компьютера РС. При проведении калибровки амплитуда сигналов  $A_j$  на входе формирователя временных отметок линейно изменяется в широких пределах (от  $A_{\min} = -0.1$  В до  $A_{\max} = -2$  В с шагом 0.1 В) непосредственно в процессе накопления массива результатов измерений по схеме, представленной на рис. 3. Синхронизация процессов измерения и управления генератором осуществляется программой от компьютера: после каждых 20-ти измерений временных интервалов процесс измерения останавливался, задавалось новое значение амплитуды  $A_j$  импульсов, давалась выдержка на переходные процессы в генераторе и измерения возобновлялись. Графики таких калибровочных испытаний представлены на рис. 6. Они свидетельствуют о наличии нелинейной зависимости задержки дискриминатора с постоянным порогом от амплитуды импульса на его входе (характерно, что задержка для импульсов малой амплитуды резко увеличена). Эти данные служат основой для определения корректирующей функции, по которой в дальнейшем корректируются результаты измерений временных интервалов.

На рис. 6а тонкими линиями показан также результат коррекции применительно к калибровочным данным. При этом с.к.о. результатов измерения временных интервалов уменьшается с 70 (StdOld) до 5.6 пс (StdNew), что демонстрирует эффективность амплитудной коррекции.

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ FSS

Оценка точности *FSS* проводилась по описанной выше методике, согласно схеме на рис. 3, причем диапазон изменения амплитуд был таким же, как и при калибровке (от  $-0.1$  до  $-2.0$  В с шагом 0.1 В). Для каждого значения амплитуды проводилось накопление  $n = 5000$  результатов измерений и вычислялись оценки средних значений  $M[P_j]$  и  $M[P_{c_j}]$ . Зависимости  $M[P]$  и  $M[P_c]$  от амплитуды сигнала  $A$  приведены на рис. 7. Из графика для величины  $M[P_c]$  следует, что точность привязки (time walk)  $\max M[P_c] - \min M[P_c]$  для исследованного формирователя составляет 17 пс при использовании амплитудной коррекции. Диапазон изменения величины  $M[P]$  составляет примерно 500 пс, что и соответствует точности привязки *LED* без использования амплитудной коррекции. Как уже указывалось, погрешность этих оценок составляет 0.2 пс.

Среди других параметров *FSS* интерес представляют задержка и вносимый джиттер. Эти параметры можно определить путем сопоставления результатов измерений, полученных при фиксированной амплитуде стоповых сигналов (рис. 5), и результатов измерений, согласно схеме на рис. 3, но при исключении блока *FSS*. При этом задержка *FSS* составила 5.5 нс, а его джиттер 1.15 пс.

## ВЫВОДЫ

Возможности современных генераторов и измерителей времени широкого применения таковы, что позволяют имитировать сигналы скоростных сенсоров и исследовать точность временной привязки на уровне нескольких пикосекунд.

Предлагаемая методика применима для оценки точности любого типа *FSS* и обеспечивает погрешность  $\leq 0.2$  пс.

*LED*-формирователь временных отметок, дополненный измерителем амплитуды и амплитудной коррекцией, может обеспечить точность привязки в пикосекундном диапазоне.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Фонда Латвийского университета и компании MikroTik.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелешко Е.А. Быстродействующая импульсная электроника. М.: Физматлит, 2007.
2. HRM-CFD Constant Fraction Discriminator. [http://www.sensl.com/downloads/ds/DS-110522\\_CFD\\_v1p1.pdf](http://www.sensl.com/downloads/ds/DS-110522_CFD_v1p1.pdf)
3. Model 2128A Constant Fraction Discriminator. <https://www3.nd.edu/~wzech/2128a.pdf>

4. N605 4 Channel 200 MHz Constant Fraction Discriminator.  
[https://www.sii.co.jp/jp/segg/files/2015/08/BF3268\\_N605\\_4\\_ch\\_CFD\\_r3W.pdf](https://www.sii.co.jp/jp/segg/files/2015/08/BF3268_N605_4_ch_CFD_r3W.pdf)
5. Денисов С.П., Dzierba A., Клименко А.К., Mitchell R., Самойленко В.Д., Scott E., Smith P., Teige S. // ПТЭ. 2006. № 4. С. 50.
6. Лубсандоржиев Б.К., Кузнецов Л.А., Васильев Р.В. // ПТЭ. 2003. № 2. С. 42.
7. Григорьев В.А., Каплин В.А., Кондратьева Н.В., Краштанёнок А.В., Логинов В.А., Макляев Е.Ф., Сурков А.В. // ПТЭ. 2011. № 3. С. 62.
8. Artyukh Yu., Bepal'ko V., Lapushka K., Rybakov A. // Proc. of the 15<sup>th</sup> International Workshop on Laser Ranging. Canberra, 2008. V. 2. P. 306.  
<https://cddis.nasa.gov/lw15/docs/papers/Event%20Timing%20System%20for%20Riga%20SLR%20Station.pdf>
9. Беспалько В.А. // ПТЭ. 2009. № 2. С. 57.
10. Rybakov A. // Automatic Control and Computer science. 2001. V. 35. № 3. P. 11.
11. Карпеков Ю.Д., Солдатов М.М., Якимчук В.И. Препринт ИФВЭ 2014-12. Протвино, 2014.
12. Photomultiplier Tubes. Basics and Applications. Hamamatsu Photonics K.K., 2007.
13. Artyukh Yu., Bepal'ko V., Boole E., Vedin V. // Proc. of the 17th International Workshop on Laser Ranging. Bad Koetzing, Germany, 2011. P. 107.  
[https://cddis.nasa.gov/lw17/docs/papers/session7/03-Artyukh\\_et\\_al\\_1.pdf](https://cddis.nasa.gov/lw17/docs/papers/session7/03-Artyukh_et_al_1.pdf)