

В. П. Рубан, А. А. Шуба, А. Г. Почанин, Г. П. Почанин

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: ruban@ire.kharkov.ua, gpp@ire.kharkov.ua

СТРОБОСКОПИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ ПРИ АНАЛОГОВОМ НАКОПЛЕНИИ

Применение аналогового накопления в стробоскопическом преобразователе ведет к увеличению динамического диапазона стробоскопического приемного устройства. Однако в научной литературе нет сведений о том, как влияет аналоговое накопление на характеристики стробоскопического преобразователя. Для выяснения этого авторами решена модельная задача стробоскопического преобразования и проведены соответствующие эксперименты для проверки теоретических выводов. Исследовано влияние аналогового накопления сигналов на такие характеристики стробоскопического преобразователя: коэффициент передачи, переходная характеристика, рабочая полоса частот. Исследование показало, что аналоговое накопление приводит к уменьшению времени нарастания переходной характеристики и, соответственно, к расширению рабочей полосы преобразователя. При этом коэффициент передачи остается неизменным. Результаты исследования полезны в практическом плане для создания высокочувствительной сверхширокополосной измерительной аппаратуры. Ил. 10. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: стробоскопическое преобразование, выборка, аналоговое накопление, стробоскопический смеситель, переходная характеристика.

Повышение чувствительности стробоскопического преобразователя актуально для сверхширокополосной (СШП) импульсной радиолокации, рефлектометрии [1, 2] и ряда других приложений. Эта проблема непосредственно обусловлена необходимостью расширения динамического диапазона приемного измерительного устройства. Так как сверху динамический диапазон преобразователя определяется пробойным напряжением полупроводниковых приборов входной цепи и слабо поддается коррекции, то уменьшение уровня шумов приемника выглядит единственным реальным путем увеличения динамического диапазона СШП радиосистемы. В частности, актуальной на сегодняшний день является проблема расширения динамического диапазона стробоскопического приемника видеоимпульсного георадара [3].

Вместе с цифровой обработкой (цифровым накоплением) и вариацией рабочей полосы частот приемника [4] решением этой проблемы может быть использование аналогового накопления сигналов в стробоскопическом преобразователе, когда накопительная емкость стробоскопического смесителя дозаряжается/доразряжается при повторном стробировании сигнала в одном и том же участке периодически повторяющегося сигнала несколько раз.

В работах [5, 6] рассматривались отдельные аспекты влияния аналогового накопления на результат стробоскопического преобразования. В патенте [6] проиллюстрировано существенное влияние токов утечки стробоскопического смесителя, работающего с накоплением сигналов, на коэффициент передачи. Однако авторам не известны работы, в которых дано полное и систематическое исследование того, как влияет аналого-

вое накопление сигналов на результат стробпреобразования.

Стробоскопическое преобразование при аналоговом накоплении возможно как в преобразователе с обратной следящей связью, дозаряжающей/доразряжающей накопительную емкость [7], так и в преобразователе со сбросом накопленного заряда [8]. Однако проще всего его организовать в преобразователе без каких-либо дополнительных корректирующих элементов. В этой схеме заряд накопительной емкости до уровня напряжения входного сигнала происходит за меньшее количество повторений стробирования по сравнению со смесителем в котором используется сброс накопленного заряда, а простота изготовления стробоскопического смесителя без обратных связей определила выбор исследуемой схемы.

В нашей работе исследуется влияние аналогового накопления сигналов на характеристики стробоскопического преобразователя: коэффициент передачи, переходную характеристику (ПХ), рабочую полосу частот. Теоретическому исследованию влияния процессов заряда накопительной емкости и токов утечки на характеристики преобразования посвящен разд. 1. В разд. 2 приведены результаты экспериментальных исследований стробоскопического преобразователя, использующего режим аналогового накопления сигналов.

1. Моделирование. Для оценки влияния аналогового накопления сигналов на характеристики стробоскопического преобразователя выполнено численное моделирование процесса преобразования. В качестве исследуемой модели была выбрана упрощенная эквивалентная схема стробоскопического смесителя (рис. 1). В этой модели

диодный смеситель представлен в виде ключа S , который замыкается на короткое время δ .

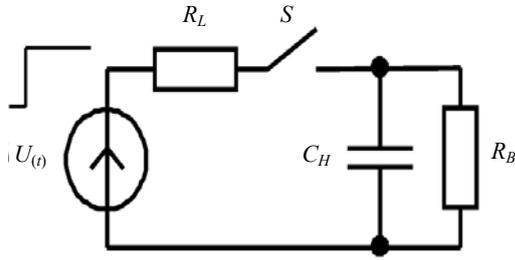


Рис. 1. Эквивалентная схема стробоскопического смесителя

В течение этого времени через сопротивление R_L к накопительному конденсатору прикладывается напряжение от внешнего источника $U(t)$ и при этом конденсатор C_H заряжается, если начальное напряжение конденсатора было меньше напряжения сигнала или разряжается, если начальное напряжение конденсатора было больше. Процесс заряда / разряда конденсатора при замкнутом ключе называется выборкой из сигнала или стробированием, а время δ , в течение которого ключ замкнут, называют длительностью выборки. В течение времени между последующими выборками T_R , которое называется временем хранения, конденсатор теряет часть заряда вследствие токов утечки через высокоомное сопротивление буферного усилительного каскада R_B [7].

Процессы заряда и разряда конденсатора во время выборки и хранения описываются линейным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка

$$\begin{cases} \frac{dv_n^i}{dt} + \frac{v_n^i}{\tau} = \frac{U(t)}{\tau}, \\ v_{0n}^i = v_n^{i-1} \left(T_n + \frac{\delta}{2} \right) e^{-\frac{T_R}{R_B C_H}}, \\ t_{0n} = T_n - \frac{\delta}{2}, \\ t_{1n} = T_n + \frac{\delta}{2}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $U(t)$ – сигнал, подаваемый на вход преобразователя; $\tau = R_L \times C_H$ – постоянная времени заряда накопительной емкости; R_L – эквивалентное сопротивление стробоскопического смесителя; C_H – емкость накопительного конденсатора; мно-

житель $e^{-\frac{T_R}{R_B C_H}}$ описывает разряд накопительного конденсатора во время фазы хранения заряда, которая длится время T_R – период повторения сигналов. Таким образом в дифференциальном урав-

нении (1) учтены токи утечки через сопротивление буферного усилителя R_B .

Для моделирования стробоскопического преобразования задавалось временное окно, в котором происходит наблюдение сигналов. Оно разбивалось на N одинаковых интервалов времени. В конце каждого n -го интервала ($1 \leq n \leq N$) производилась выборка из сигнала (рис. 2).

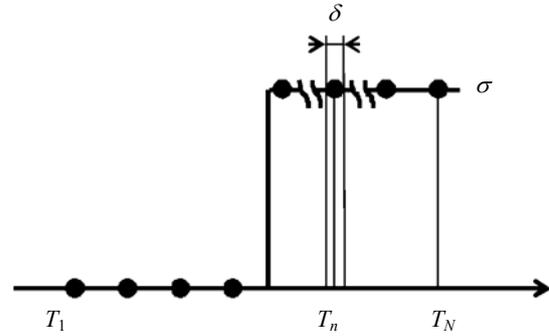


Рис. 2. Стробирование сигнала

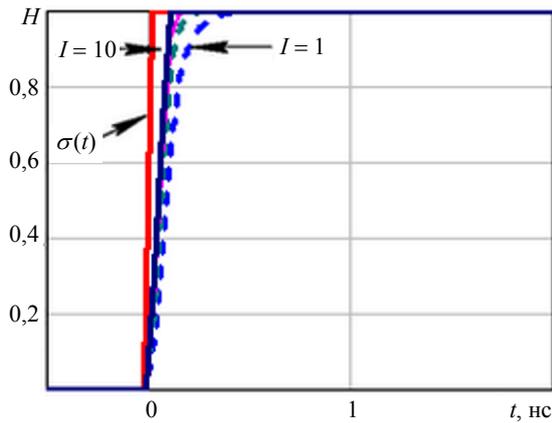
Соответственно с этим описанием в уравнении (1) T_n обозначен момент времени, когда производится выборка из сигнала, δ – длительность выборки.

Индекс $1 \leq i \leq I$ обозначает переменную аналогового накопления. Для каждого T_n дифференциальное уравнение (1) решалось численным методом Рунге–Кутты с начальным условием v_{0n}^i на интервале (t_{0n}, t_{1n}) заданное число I раз и, таким образом, определялась v_n – конечная величина напряжения, сохраненного на C_H .

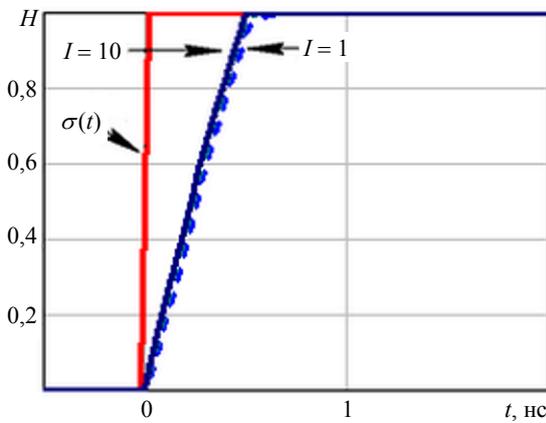
В качестве входного сигнала задавалась σ -функция (рис. 2). Моделировалось преобразование входного сигнала, имеющего временную зависимость в виде ступенчатого перепада напряжения, во временном окне 10 нс, для $N = 256$.

На рис. 3, а показан результат вычислений для выбранного $\delta = 0,1$ нс и накоплений I от 1 до 10. Как видно из графиков, с увеличением I преобразованный сигнал по форме приближается к ступеньке, что свидетельствует об уменьшении времени нарастания ПХ и расширении рабочей полосы частот стробоскопического преобразователя. Однако при $\delta = 0,5$ нс отличие между преобразованным сигналом с накоплением и без менее заметно, что демонстрирует рис. 3, б.

Более детально зависимости времени нарастания ПХ от параметров I, δ показаны на рис. 4, а. Также на рис. 4, б, показан график зависимости рабочей полосы частот преобразователя от длительности выборки при накоплениях 1–3 и 10.



а)

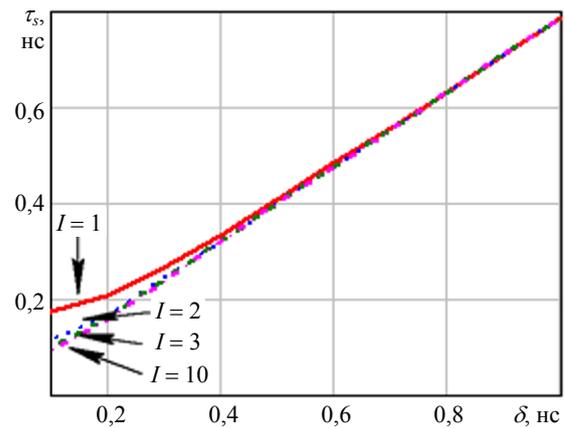


б)

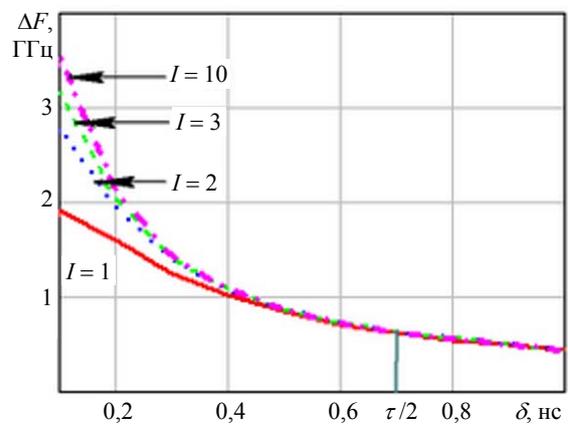
Рис. 3. Нормированные по максимуму переходные характеристики H при $\delta = 0,1$ нс (а) и $\delta = 0,5$ нс (б)

Значения рабочей полосы были получены по известным формулам преобразования импульсной характеристики и амплитудно-частотной характеристики устройства [9]. Значение полосы взято по уровню -3 дБ от максимума амплитудно-частотной характеристики.

Из графиков рис. 4 видно, что влияние аналогового накопления на ПХ и рабочую полосу ΔF увеличивается с уменьшением δ . Так, для $\delta = 0,4$ нс ΔF изменяется только на $0,1$ ГГц при изменении режима накопления от $I = 1$ до $I = 10$, в то время как для $\delta = 0,1$ нс величина ΔF меняется на $1,5$ ГГц. Это объясняется тем, что при длительностях выборки, значения которых сравнимы или больше $\tau/2$, накопительная емкость заряжается до уровня напряжения, соответствующего мгновенному значению входного сигнала, за меньшее число повторений стробирования. А при $\delta \ll \tau/2$, чтобы дозарядить накопительную емкость, необходимо большее количество стробирований. При этом эффект от применения аналогового накопления более значителен.



а)



б)

Рис. 4. График зависимостей времени нарастания ПХ (а) и рабочей полосы частот (б) от длительности выборки

Относительное расширение рабочей полосы частот $\Delta = \frac{\Delta F(I) - \Delta F(I=1)}{\Delta F(I=1)} 100\%$ может

быть использовано для количественной оценки влияния числа накоплений I на рабочую полосу преобразователя. Здесь $\Delta F(I)$ – полоса при заданных I и δ , $\Delta F(I=1)$ – полоса при работе без накопления. Графики на рис. 5 демонстрируют, при каких значениях δ аналоговое накопление больше всего влияет на расширение ΔF .

Как видно, при $\delta/\tau = 0,5$ вклад в Δ от накопления незначительный, в то время как при выборках $\delta/\tau = 0,1$ относительная рабочая полоса частот Δ значительно расширяется и достигает 80% при $I = 10$.

Влияние токов утечки на коэффициент передачи. Если изменять δ , оставив постоянным значение $I = 3$, получим набор кривых, изображенных на рис. 6. Здесь показаны преобразованные сигналы при различных δ от $0,1$ до 1 нс.

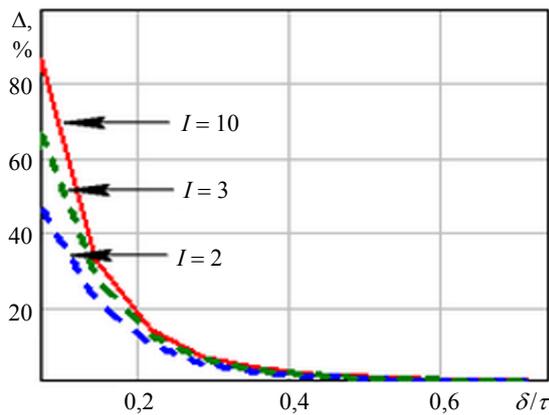


Рис. 5. Влияние аналогового накопления на ширину рабочей полосы частот

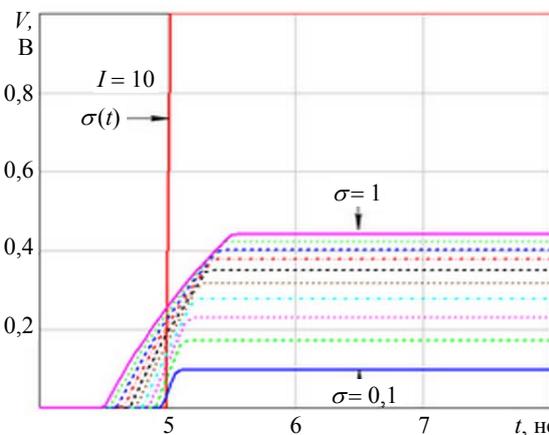


Рис. 6. Преобразование ступенчатого сигнала с δ от 0,1 до 1 нс

Видно, что при преобразовании σ -функции длительность выборки определяет коэффициент передачи стробоскопического смесителя. Предполагалось, что на конденсаторе C_H должно происходить приращение заряда до тех пор, пока потенциалы конденсатора и генератора не выровняются, однако этого не наблюдается из-за наличия токов утечки.

Таким образом, численное моделирование процесса стробоскопического преобразования сигналов при аналоговом накоплении показывает, что результатом аналогового накопления является расширение рабочей полосы стробоскопического смесителя. Кроме того, моделирование при различных длительностях выборки иллюстрирует, как влияет изменение длительности выборки на процесс преобразования. Наибольший вклад аналогового накопления в расширение рабочей полосы частот (на 80 % при $I=10$) в данном случае наблюдается при длительностях выборки, гораздо меньше τ .

2. Экспериментальные исследования.

Для определения переходной характеристики устройства необходимо на вход подать перепад напряжения с очень малым по сравнению с време-

нем нарастания ПХ фронтом. Однако когда время нарастания ПХ сравнимо с длительностью фронта сигнала, то оценить его можно при помощи уравнения [7]

$$(t_m)^2 \approx (\tau_s)^2 + (t_f)^2, \quad (2)$$

где t_m – измеренное значение времени нарастания фронта импульса; τ_s – время нарастания ПХ; t_f – длительность фронта импульса.

В эксперименте использовался стробоскопический преобразователь с диодной схемой смесителя, работающий в режиме без сброса накопленного заряда и без дозаряда накопительной емкости через обратные связи. В преобразователе применен генератор стробимпульсов на диодах с накоплением заряда. Отличительная особенность данного генератора заключается в том, что в нем была предусмотрена возможность регулировки длительности стробимпульса при помощи тока диода с накоплением заряда генератора стробимпульсов [10, 11]. На рис. 7 показаны измеренные с помощью осциллографа С1-70 с измерительным блоком Я40-1700 формы стробимпульсов при различных токах через диод.

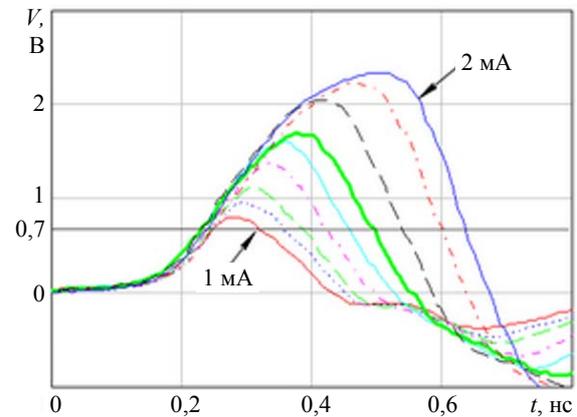


Рис. 7. Регулировка длительности стробимпульса

Длительность стробимпульсов Δt измерялась по уровню напряжения, близкому к уровню открывания диода смесителя. Получен диапазон изменения Δt от 100 до 400 пс.

На вход преобразователя подавался импульс амплитудой 140 мВ и длительностью фронта 100 пс. Синхронизация времени прихода сигнала на вход приемника и времени стробирования осуществлялась цифровой линией задержки. Управляли параметром Δt , а также цифровой линией задержки и количеством накоплений I (от 1 до 10) с помощью цифрового блока управления. Кроме того, цифровой блок генерировал синхримпульсы с частотой 100 кГц для генератора импульсов, принимал данные от 16-разрядного

аналого-цифрового преобразователя и передавал их в компьютер через Ethernet-порт.

Преобразование сигнала с коротким фронтом позволяет оценить время нарастания переходной характеристики преобразователя. На рис. 8 показаны преобразованные сигналы при различных количествах накоплений, когда $\Delta t = 170$ пс. Как видно из рисунка, так же, как и при моделировании преобразования перепада напряжения, в этих сигналах фронт становится короче с увеличением количества накоплений.

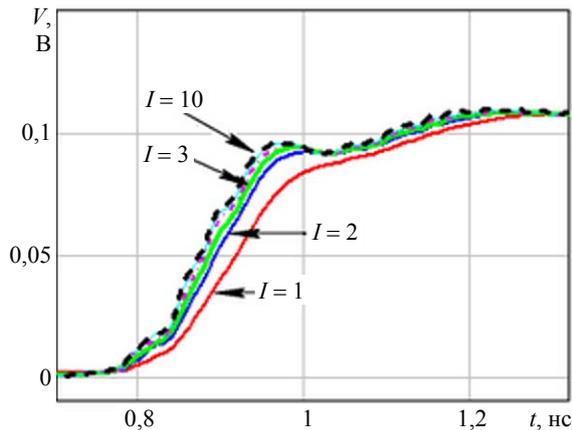


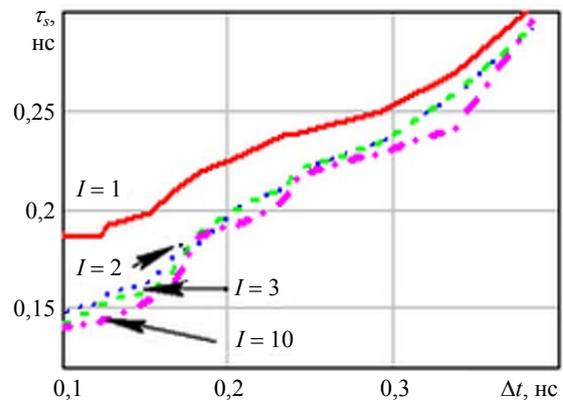
Рис. 8. Фронт импульса при различных количествах накоплений, длительность стробимпульса 170 пс

Можно заметить, что количество накоплений не влияет на максимальную амплитуду преобразованного сигнала и, таким образом, количество аналоговых накоплений не влияет на коэффициент передачи смесителя, работающего в режиме без сброса накопленного заряда и без дозаряда накопительной емкости через обратные связи.

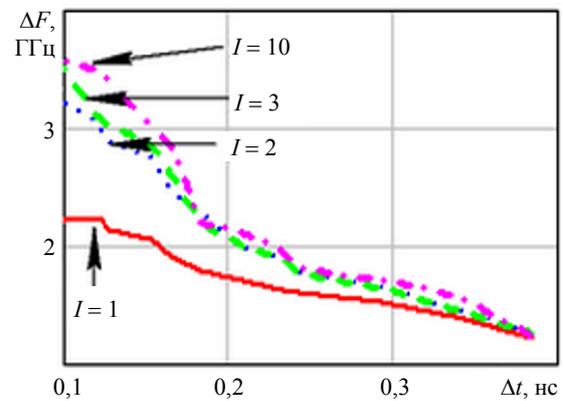
Выражение (2) использовано для определения τ_s и построения зависимости τ_s от длительности стробимпульса Δt для заданного числа накоплений. На рис. 9, а показаны зависимости $\tau_s(\Delta t)$ при $I = 1-3$ и 10. Также на рис. 9, б приведены значения рабочей полосы, получаемой при $I = 1-3$ и 10. Эти значения вычислены по формуле $\Delta F \approx \frac{0,35}{\tau_s}$ [7].

В полученных зависимостях $\tau_s(\Delta t, I)$ и $\Delta F(\Delta t, I)$ (рис. 9), как и в расчетных зависимостях, наблюдается тенденция к уменьшению влияния накопления при увеличении длительности стробимпульса, что подтверждает правильность расчетов. Неравномерность зависимостей τ_s и ΔF от Δt связана с погрешностью измерения длительности стробимпульса и с тем, что диод в открытом состоянии (под действием стробим-

пульса) имеет нелинейную зависимость сопротивления от времени, приводящую к погрешности в оценке продолжительности выборки.



а)



б)

Рис. 9. Зависимости времени нарастания ПХ и рабочей полосы частот от длительности стробимпульса и числа накоплений

Коэффициент передачи смесителя. Как показывают расчетные данные и данные эксперимента, коэффициент передачи $K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$ стробоскопического смесителя, работающего в режиме без сброса накопленного заряда и без дозаряда накопительной емкости через обратные связи, не зависит от количества накоплений ($U_{\text{вх}}$ – амплитуда сигнала на входе смесителя, $U_{\text{вых}}$ – измеряемое напряжение на выходе смесителя). На рис. 10 показаны расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента передачи от длительности выборки (для расчетов) и длительности стробимпульса (для эксперимента).

Из графиков видно, что с уменьшением длительности выборки увеличивается несовпадение значений $K(\delta)$ и $K(\Delta t)$. Причина несовпадения связана как с погрешностью при измерении длительности стробимпульсов, так и с тем, что в выбранной модели не была учтена зависимость

сопротивления диода от амплитуды стробимпульса, в результате чего получилось некоторое несоответствие значений Δt и δ . Данный график, скорее качественно, показывает тенденцию изменения коэффициента передачи стробоскопического смесителя от длительности стробимпульса.

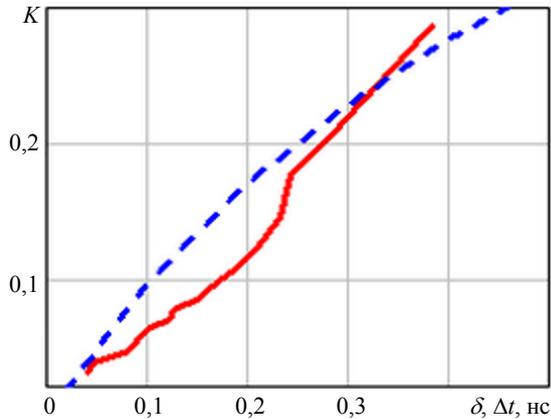


Рис. 10. Коэффициент передачи, расчетное (штриховая линия) и экспериментальное значение (сплошная линия)

Выводы. Таким образом, численное моделирование процесса стробоскопического преобразования сигналов при аналоговом накоплении (в преобразователе без сброса накопленного заряда и без следящих связей) показывает, что аналоговое накопление приводит к уменьшению времени нарастания переходной характеристики стробоскопического преобразователя и, соответственно, к расширению его рабочей полосы частот. Большее влияние накопления наблюдается при малых (по сравнению с постоянной времени заряда накопительной емкости) длительностях выборки. Так, при длительностях выборки величина которых на порядок меньше постоянной времени заряда накопительной емкости, рабочая полоса расширяется на 1,5 ГГц при 10 накоплениях, что составляет 80 % от значения рабочей полосы без накоплений, в то время как при длительностях выборки, сравнимых с половиной величины постоянной времени заряда накопительной емкости, влияние аналогового накопления на рабочую полосу практически отсутствует.

Данные, полученные в экспериментах по определению свойств стробоскопического преобразования сигналов при аналоговом накоплении с использованием стробоскопического преобразователя, в котором предусмотрена возможность регулировки длительности стробимпульса (в пределах от 0,1 до 0,4 нс), подтвердили корректность расчетов для выбранной модели стробоскопического смесителя. Как и при моделировании, в эксперименте наблюдалось расширение рабочей полосы преобразователя вследствие применения аналогового накопления при длительностях строб-

импульса, намного меньших значения постоянной времени заряда накопительной емкости смесителя.

Работа выполнена в рамках проекта «Радиолокационный мониторинг технического состояния подповерхностной части инженерных сооружений» комплексной программы научных исследований НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» («РЕСУРС»).

Библиографический список

1. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* / Ed. by H. Jol. – Oxford: Elsevier, 2009. – 524 p.
2. *Вопросы подповерхностной радиолокации*. Коллективная монография / под ред. А. Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
3. *Астанин Л. Ю. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений* / Л. Ю. Астанин, А. А. Костылев. – М.: Радио и связь, 1989. – 190 с.
4. *Пат. 96241* Україна: IPC9 H04B 1/06 Стробоскопічний спосіб реєстрації сигналів / Г. П. Почанін, В. П. Рубан. – № 96241; заявл. 07.12.2010; опубл. 10.10.2011, бюл. № 19. – 4 с.
5. *Грязнов М. И. Измерение параметров импульсов* / М. И. Грязнов, М. Л. Гуревич, Ю. Я. Рябинин. – М.: Радиосвязь, 1991. – 215 с.
6. *Patent 5345471 USA Int. Cl.⁵ H04K1/00. Ultra-wideband receiver* / McEwan; № 5345471; filing date 12.04.1993; iss. date 06.09.1994. – 14 p.
7. *Рябинин Ю. А. Стробоскопическое осциллографирование* / Ю. А. Рябинин. – М.: Сов. радио, 1972. – 272 с.
8. *Ruban V. P. Symmetric sampling gate with stored charge dumping* / V. P. Ruban // Proc. 3d Intern. Conf. "Ultra-wideband and Ultrashort Impulse Signals" (UWBUSIS). – Sevastopol, 2006. – P. 209–210.
9. *Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов* / С. И. Баскаков. – 2-е изд., переработ. и дополн. – М.: Высш. шк., 1988. – 446 с.
10. *Ruban V. P. Sampling pulse width versus forward current in the step recovery diode* / V. P. Ruban, O. O. Shuba // Proc. 6th Intern. Conf. "Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals" (UWBUSIS). – Sevastopol, 2012. – P. 72–74.
11. *Вдовин Г. Н. Широкополосный стробоскопический преобразователь* / Г. Н. Вдовин, Л. В. Духовской, В. И. Тренев // Вопросы радиоэлектрон. – 1968. – VI, № 3. – С. 7–10.

Рукопись поступила 6.11.2014.

V. P. Ruban, O. O. Shuba,
O. G. Pochanin, G. P. Pochanin

SIGNAL SAMPLING WITH ANALOG ACCUMULATION

The use of analog accumulation in a sampling converter increases the dynamic range of the sampling receiver. However, there is no information about the analog accumulation effect on the sampling converter performance in the scientific literature. To clarify it, the authors have solved the model problem of sampling conversion and performed appropriate experiments to verify theoretical conclusions. The influence of analog accumulation on such sampling converter characteristics as the transmission coefficient, the transient response, the operating frequency band has been investigated. The investigation has shown that analog accumulation leads to reducing the rise time of the transient response

and, accordingly to broadening the operating bandwidth of the sampling converter. The transmission coefficient remains constant at that. The investigation results are useful for practice in order to create highly sensitive UWB equipment.

Key words: sampling conversion, sampling, analog accumulation, sampling gate, transient response.

В. П. Рубан, О. О. Шуба,
О. Г. Почанін, Г. П. Почанін

СТРОБОСКОПІЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ ПРИ АНАЛОГОВОМУ НАКОПИЧЕННІ

Застосування аналогового накопичення в стробоскопічному перетворювачі веде до збільшення динамічного діапазону стробоскопічного приймального пристрою. Однак у

науковій літературі немає відомостей про те, як впливає аналогове накопичення на характеристики стробоскопічного перетворювача. Для з'ясування цього авторами розв'язано модельну задачу стробоскопічного перетворення та проведено відповідні експерименти для перевірки теоретичних висновків. Досліджено вплив аналогового накопичення сигналів на такі характеристики стробоскопічного перетворювача: коефіцієнт передачі, перехідна характеристика, робоча смуга частот. Дослідження показало, що аналогове накопичення призводить до зменшення часу зростання перехідної характеристики та, відповідно, до розширення робочої смуги частот перетворювача. При цьому коефіцієнт передачі залишається незмінним. Результати дослідження корисні в практичному плані для створення високочутливої надширокопasmової вимірювальної апаратури.

Ключові слова: стробоскопічне перетворення, вибірка, аналогове накопичення, стробоскопічний змішувач, перехідна характеристика.