

Цифровой фазовращатель на основе программируемого таймера

Т.Н. Сабиров¹, М.А. Смирнов²

¹Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет имени А. Н. Туполева

²Казанский Квантовый Центр (КАИ-КВАНТ)

Аннотация: Современные схемы фазовращателей, используемые в радиоприемниках, антенных системах, синхронных детекторах, ограничены в широком диапазоне частот зависимостью фазового сдвига на выходе схемы от частоты входного сигнала. В данной работе предлагается новая схема программируемого фазовращателя, которая позволяет использовать фазовращатель в широком частотном диапазоне независимо от частоты входного сигнала, а также осуществлять сдвиг фазы с высокой точностью.

Ключевые слова: фазовращатель, синхронный детектор, линия задержки.

Введение

Фазовращатель, как правило, представляет собой сегмент электрической схемы, обеспечивающий фазовый сдвиг выходного электрического сигнала относительно входного. Фазовращатели широко применяются в разнообразных устройствах: радиоприемниках [1], измерительных установках [2], антенных системах, антенных решетках для формирования требуемой диаграммы направленности [3], согласующих устройствах [4] и др. Фазовращатель является одним из основных узлов в синхронных детекторах [5,6], широко применяемых в измерительной технике для детектирования крайне слабых переменных электрических сигналов (вплоть до единиц нВ).

Общий принцип работы фазовращателя можно проиллюстрировать на примере четырёхполюсника [7]. При подаче на входные контакты четырёхполюсника переменного напряжения $U(t) = U_0 \exp[-j\omega t]$, на выходных контактах будем иметь напряжение $U(t) = U_0 \exp[-j(\omega t + \varphi)]$, где φ – фазовый сдвиг сигнала. В качестве простейшего фазовращателя может служить мостовая схема из двух резисторов с сопротивлениями R_1 , R_2 и двух конденсаторов с ёмкостями C_1 , C_2 расположенных напротив друг друга в виде четырехугольника (четырёхполюсник). Амплитуда переменного

напряжения с частотой ω на выходе такой схемы равна по амплитуде напряжению на входе, если выполняется $R_1C_1=R_2C_2$, а сдвиг по фазе φ определяется из выражения:

$$\tan \varphi = \frac{2\omega C_1 R_1}{(\omega C_1 R_1)^2 - 1} \quad (1)$$

При равенстве емкостных и омических сопротивлений $1/\omega C = R$ сдвиг фаз между входными и выходными напряжениями составляет $\pi/2$ [8]. Более сложные фазовращатели представляют собой устройства на основе электрических трансформаторов. На практике можно встретить схемы с использованием операционного усилителя, в которых сдвиг фазы входного сигнала осуществляется также с помощью дополнительной RC-цепочки. Управление смещением фазы в вышеописанных схемах осуществляется путём использования переменного резистора в участках схемы, регулирующих фазовый сдвиг.

Существенным недостатком таких схем, ограничивающим их применение в широком диапазоне частот, является зависимость фазового сдвига на выходе схемы от частоты входного сигнала. Данное обстоятельство позволяет использовать аналоговые схемы только на определённой частоте или вблизи неё. Проблему можно решить путём использования средств цифровой техники при конструировании фазовращателя. В работе предлагается новая схема цифрового фазовращателя на базе программируемого таймера в широком диапазоне входного сигнала с плавным высокоточным сдвигом фазы.

Основная часть

Структурная схема рассматриваемого фазовращателя представлена на рис. 1. Она состоит из шести основных частей: компаратор [9], выделитель

заднего и переднего фронта сигнала, таймер, делитель частоты на 2, модуль ввода/вывода, тактовый генератор.

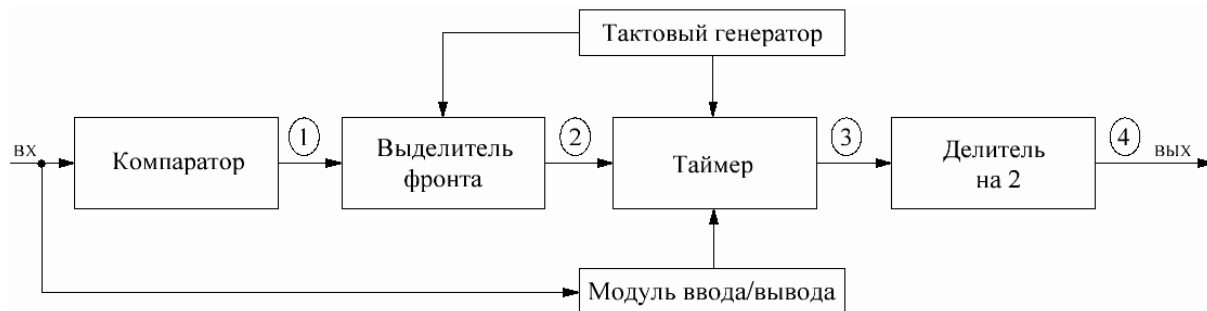


Рис. 1 – Структурная схема фазовращателя

Через компаратор входной сигнал подаётся на выделитель фронта. В качестве входного сигнала, может использоваться как сигнал синусоидальной формы, так и прямоугольной формы. «Выделитель фронта» содержит сдвоенный D-триггер (микросхема К561ТМ2), логический элемент "Исключающее ИЛИ" (микросхема К561ЛП2) и инвертор (микросхема К561ЛН2). «Выделитель фронта» формирует по одному короткому прямоугольному импульсу (длительностью в 1 тактовый сигнал) на каждый фронт прямоугольного сигнала, поступающего на него. Длительность тактового сигнала определяется частотой F используемого тактового генератора. После этого данные прямоугольные импульсы поступают на программируемый таймер (микросхема PD71054). Таймер задерживает поступающие импульсы на заданное количество тактов N , которое управляется программно. Затем сигнал поступает на последний блок электронной схемы - "Делитель на 2". Здесь импульсы преобразуются в прямоугольный сигнал, который повторяет форму входного сигнала, но сдвинут на время задержки τ относительно него. Время задержки τ численно равно отношению N/F . Управление таймером осуществляется с помощью цифровых выходов универсального модуля ввода/вывода (Е-502,

производство L-Card). Для наглядности, временные диаграммы представлены на рис. 2. Фазовый сдвиг определяется выражением

$$\varphi = N \frac{2\pi f}{F} \quad (2), \text{ где } f \text{ – это частота входного сигнала.}$$

Важно заметить, что в представленной конфигурации схема работает как линия задержки[10]. Реализация именно функций фазового сдвига осуществляется уже программным способом. При этом встроенный АЦП модуля ввода/вывода, измеряет частоту входного сигнала f . Соответственно, величина f учитывается программно. В зависимости от заданного фазового сдвига φ , вычисляется необходимое N как

$$N = \varphi \frac{F}{2\pi f} \quad (3).$$

Значение N посылается модулем ввода/вывода в таймер. Это позволяет использовать разработанную, схему в качестве фазовращателя в широком частотном диапазоне от единиц герц до сотен килогерц.

Точность установки фазового сдвига будет определяться выражением

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi f}{F} \quad (4).$$

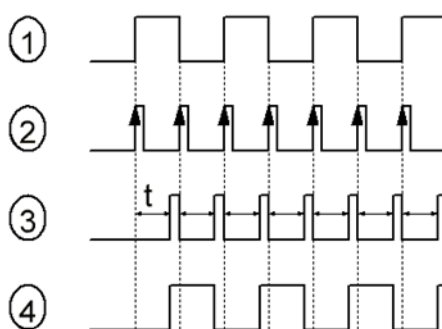


Рис. 2 – Временная диаграмма работы фазовращателя

В развернутом виде электронная структурная схема фазовращателя с программируемым таймером представлена на рис. 3.

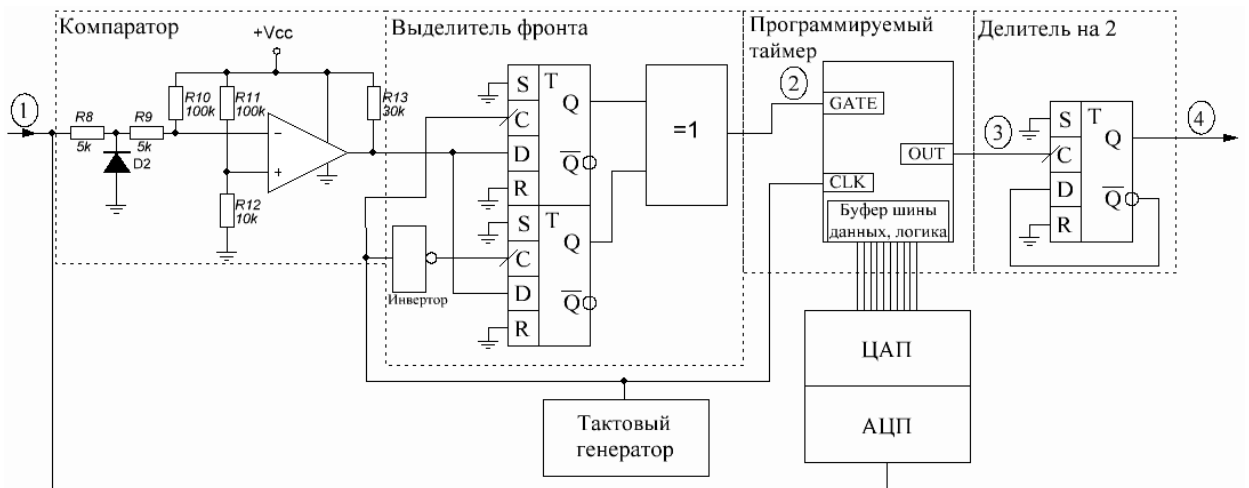


Рис. 3 – Электронная схема фазовращателя: G – сигнал с генератора

Программа управления таймером была реализована в среде LabView. Буфер шины данных состоит из 8 регистров. Количество тактов задержки N таймера устанавливается программно с помощью 16-битного числа. Чтобы задать 16 битное число, требуется сначала задать LB (младший байт – первые восемь ячеек), и следом HB (старший байт – следующие восемь ячеек). Предварительно, через буфер, с помощью логики чтения/записи, был выбран первый режим работы таймера. Схема моделирования представлена на рис. 4.

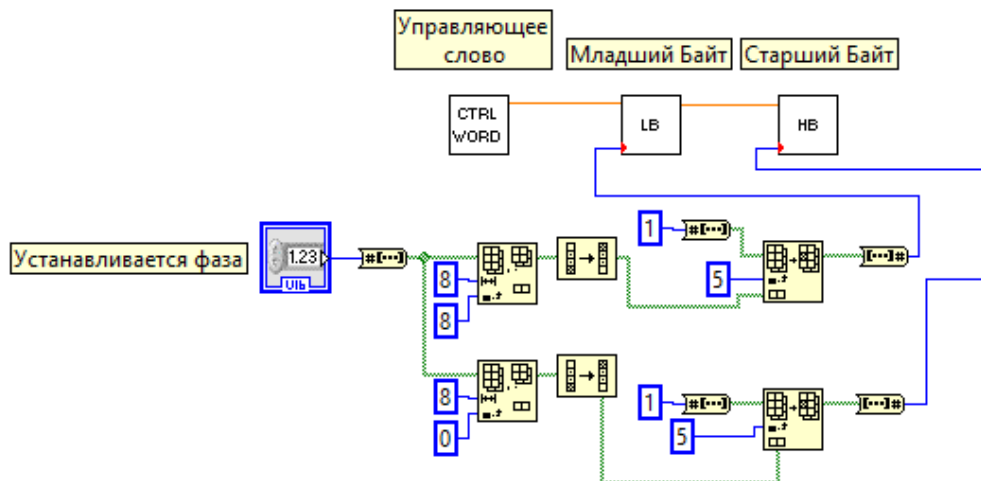


Рис. 4 – Схема модели программируемого таймера в среде LabView

По электронной схеме, представленной на рис. 4, на макетной плате был собран фазовращатель. В тестировании устройства использовался кварцевый генератор с частотой $F = 2$ МГц. На фазовращатель через компаратор попадали синусоидальные сигналы с устройства прерывателя, для кратности была выбрана частота исследуемого сигнала $f = 200$ Гц. Схема показала хорошую работоспособность. На рис. 5 представлена оцифрованная осциллограмма со сдвигом фазы φ , равным $\pi/5$ тактов ($N=1000$). Точность установки фазы $\Delta\varphi \approx 6 \cdot 10^{-4}$ рад. Схема обеспечивает задержку от 0 до 2π .

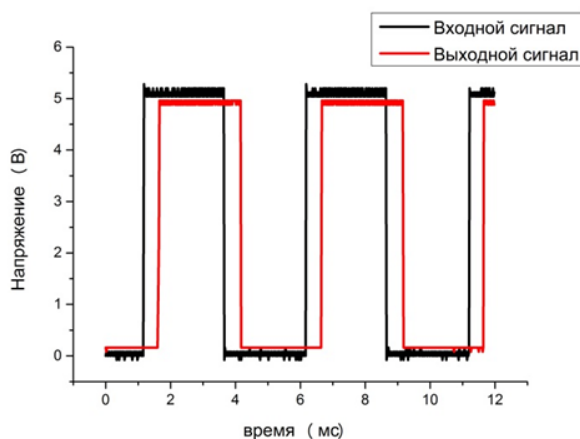


Рис. 5 – Осциллограмма программируемого фазовращателя

Максимальная частота счета таймера достигает 10 МГц, то есть для улучшения качества подстройки сигнала можно использовать генераторы с большей частотой, но не превышающей 10 МГц.

Заключение

Представленный программируемый фазовращатель может найти широкое применение в синхронных детекторах и другой измерительной технике, где требуется фазовая подстройка сигнала. Основными достоинствами разработанного цифрового фазовращателя являются возможность его применения в широком частотном диапазоне входного сигнала и осуществление сдвига фазы с высокой точностью. Предложены

структурная и электронная схемы фазовращателя с указанием использованной элементной базы. Программа управления таймером реализована в среде LabView.

Литература

1. Федчун А.А. Методы приема радиосигналов в защищённых телекоммуникационных сигналах // Известия ЮФУ. Технические науки. №11. Ростов-на-Дону. 2009. С. 239-243.
2. Горячев В.Я., Бростилова Т.Ю., Кисляков С.В. Датчики механических величин на базе фазовращателей с бегущим магнитным полем // Надежность и качество сложных систем. №1. Пенза. 2017. С. 59-69.
3. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Фазовращатели сканирующих антенн для радаров обзора территорий // Компоненты и технологии №9. 2007. С. 164-166.
4. Буторин В. М. Фазовращатель миллиметрового диапазона длин волн на двух полупроводниковых варакторах // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. Вып. 3(510). Москва. 2011. С. 55-65.
5. Kokhanov A.B. Technology of synchronous detection of signals // Radioelectronics and communications systems. New York. 2007. Vol. 50. pp. 593-602.
6. Игнатъев В.К., Якимец А.Л. Криозондовый магнитометр // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1274
7. Глухов А.Ю., Негинский И.В. Устройство для автоматического исследования нелинейных параметров ВТСП-керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ в переменных магнитных полях // Инженерный вестник Дона, 2013, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1727
8. Бутиков Е.И., Быков А.А., Кондратьев А.С. Физика в примерах и задачах. // М.: Наука. 1989. С. 464.



9. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. 2-е издание // Издательский дом «Додэка-XXI», Москва, 2007, С. 195.
10. Dudek P., Szczepanski S., Hatfield J.V. A high-resolution CMOS time-to-digital converter utilizing a Vernier delay line // IEEE Journal of Solid-State Circuits. Feb. 2000. Vol. 35. pp. 240 – 247.

References

1. Fedchun A. A. Izvestiya YFU. Tehnicheskie nauki. №11. Rostov-on-Don. 2009. pp. 239-243.
2. Goryachev V.Y., Brostilova T.Y., Kislyakov S.V. Nadejnost' I kachestvo slojnih system. Penza. 2017. pp. 59-69.
3. Vendik O.G., Parnes M.D. Komponenti i tehnologii №9. 2007. pp. 164-166.
4. Butorin V.M. Elektronnaya tehnika. SVCH-tehnoka. Seriya 1. Moscow. 2011. pp. 55-65.
5. Kokhanov A.B. Radioelectronics and communications systems. New York. 2007. Vol. 50. pp. 593-602.
6. Ignatiev V.K., Yakimec A.L. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1274>
7. Gluhov A.Y. Neginsky I.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1727>
8. Butikov E.I., Bykov A.A., Kondratyev A.S. Fizika v primerah I zadachah. Science. 1989. pp. 464.
9. Volovich G.I. Izdatelskiy dom «Dodeka-XXI» (Rus). Moscow. 2007. pp. 195.
10. Dudek P., Szczepanski S., Hatfield J.V. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2000. Vol. 35. pp. 240 – 247.