

# Управляемый фазовращатель синусоидального сигнала

Евгений Колесников

Управляемый фазовращатель обеспечивает сдвиг фазы входного синусоидального напряжения в диапазоне  $360^\circ$  при изменении управляющего напряжения постоянного тока в пределах от  $-10$  В до  $+10$  В. Фазовращатель выполнен на базе интегральных микросхем конвертеров тригонометрических функций и аналоговых умножителей напряжений. Область применения управляемого фазовращателя – электронно управляемый сдвиг фазы переменного синусоидального напряжения промышленной частоты.

Устройства, предназначенные для фазового сдвига гармонического сигнала, называются фазовращателями. Если имеется возможность регулирования фазового сдвига, то такой фазовращатель называется управляемым (УФВ).

Построение схем УФВ достаточно широко освещено в литературе по электронике. Простейшими фазосмещателями являются пассивные электрические цепи, обеспечивающие сдвиг фазы между током и напряжением – это  $RC$ - или  $RL$ -цепи [1].

УФВ на основе неуравновешенного четырёхплечевого моста, в одном из плеч которого включён конденсатор, являются также пассивными, имеют относительно простую схему и обеспечивают сдвиг фазы сигнала приблизительно от  $10^\circ$  до  $160^\circ$  изме-

нением сопротивления переменного резистора [2].

Широкое распространение на практике получили схемы активных УФВ на базе управляемых фазовых фильтров с применением операционных усилителей (ОУ). Эти УФВ осуществляют сдвиг фазы входного сигнала от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  с отстающим или опережающим фазовым углом сдвиг путём изменения сопротивления переменного резистора [3].

Применение в УФВ фазовых фильтров сделало возможным электронное управление сдвигом фазы путём замены переменных резисторов потенциально регулируемыми элементами, например, на полевом транзисторе, аналого-цифровом преобразователе или умножителе напряжений [4].

Вышеперечисленные УФВ имеют следующие недостатки: либо ручное управление и переменный коэффициент передачи, либо нелинейность регулировочной характеристики. Кроме того, все эти известные УФВ имеют узкий диапазон углов сдвига фазы.

Развитие средств современной электроники позволило коренным образом пересмотреть подход к построению устройств фазового сдвига и разработать УФВ, свободный от вышеуказанных недостатков.

При построении схемы разработанного УФВ было использовано известное тригонометрическое выражение, которое касается формулы синуса суммы двух аргументов [5]:

$$\sin(x + y) = \sin x \cos y + \cos x \sin y.$$

На рис. 1 приведена структурная схема разработанного УФВ.

УФВ содержит фазосмещатель  $\PhiСМ$  на  $90^\circ$ , первый и второй умножители напряжений  $ПН1$  и  $ПН2$ , блок масшта-

штабирования  $БМ$ , формирователь косинуса  $\PhiК$ , формирователь синуса  $\PhiС$  и сумматор  $С$  [6, 7].

УФВ работает следующим образом. Входное синусоидальное напряжение (рис. 1)  $u_{вх} = U_{m \text{ вх}} \sin \omega t$  с частотой  $\omega$  подаётся на первый вход первого умножителя  $ПН1$  и вход фазосмещателя  $\PhiСМ$  на  $90^\circ$ . Фазосмещатель  $\PhiСМ$  сдвигает фазу сигнала на  $90^\circ$  в сторону опережения. В результате на выходе фазосмещателя  $\PhiСМ$  формируется напряжение:

$$u_1 = U_{m \text{ вх}} \cos \omega t.$$

Полученное напряжение  $u_1$  подаётся на первый вход второго умножителя  $ПН2$ .

Одновременно напряжение управления  $U_y$  постоянного тока подаётся на вход блока масштабирования  $БМ$ . Для принятой максимальной величины напряжения управления  $|U_{y \text{ max}}| = |\pm 10|$  В = 10 В коэффициент передачи блока масштабирования  $БМ$  выбран равным  $K_n = 0,1л \approx 0,314$  (использовался в математической модели при моделировании УФВ). При этом на выходе блока масштабирования  $БМ$  формируется напряжение  $u_2$ , пропорциональное напряжению управления  $U_y$  и численно равно углу сдвига фазы  $\varphi$  в радианах. Полученное напряжение  $u_2$  подаётся на входы формирователей косинуса  $\PhiК$  и синуса  $\PhiС$ .

После тригонометрического преобразования напряжения  $u_2$  на выходе формирователя косинуса  $\PhiК$  формируется напряжение  $u_3 = \cos \varphi$ . Напряжение  $u_3$  подаётся на второй вход первого умножителя  $ПН1$  (рис. 1). При этом на выходе формирователя синуса  $\PhiС$  формируется напряжение  $u_4 = \sin \varphi$ . Напряжение  $u_4$  подаётся на второй вход второго умножителя  $ПН2$  (рис. 1).

Умножители  $ПН1$  и  $ПН2$  производят перемножение соответствующих входных сигналов  $u_{вх}$  и  $u_1$  на сигналы, полученные на выходе формирователей косинуса  $\PhiК$  и синуса  $\PhiС$ . Соответственно  $u_3 = \cos \varphi$  и  $u_4 = \sin \varphi$ .

В результате на выходах умножителей  $ПН1$  и  $ПН2$  формируются напряжения соответственно  $u_5$  и  $u_6$ :

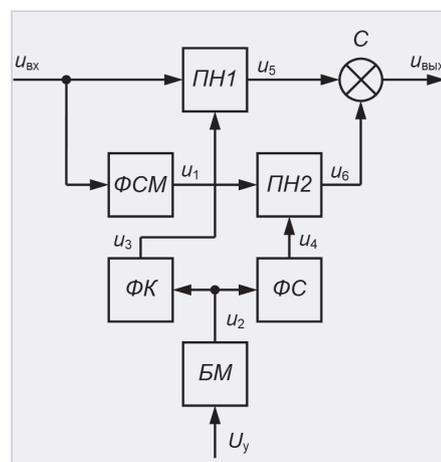


Рис. 1. Структурная схема управляемого фазовращателя:  $\PhiСМ$  – фазосмещатель;  $ПН1$ ,  $ПН2$  – перемножители напряжений 1, 2;  $БМ$  – блок масштабирования;  $\PhiК$  – формирователь косинуса;  $\PhiС$  – формирователь синуса;  $С$  – сумматор

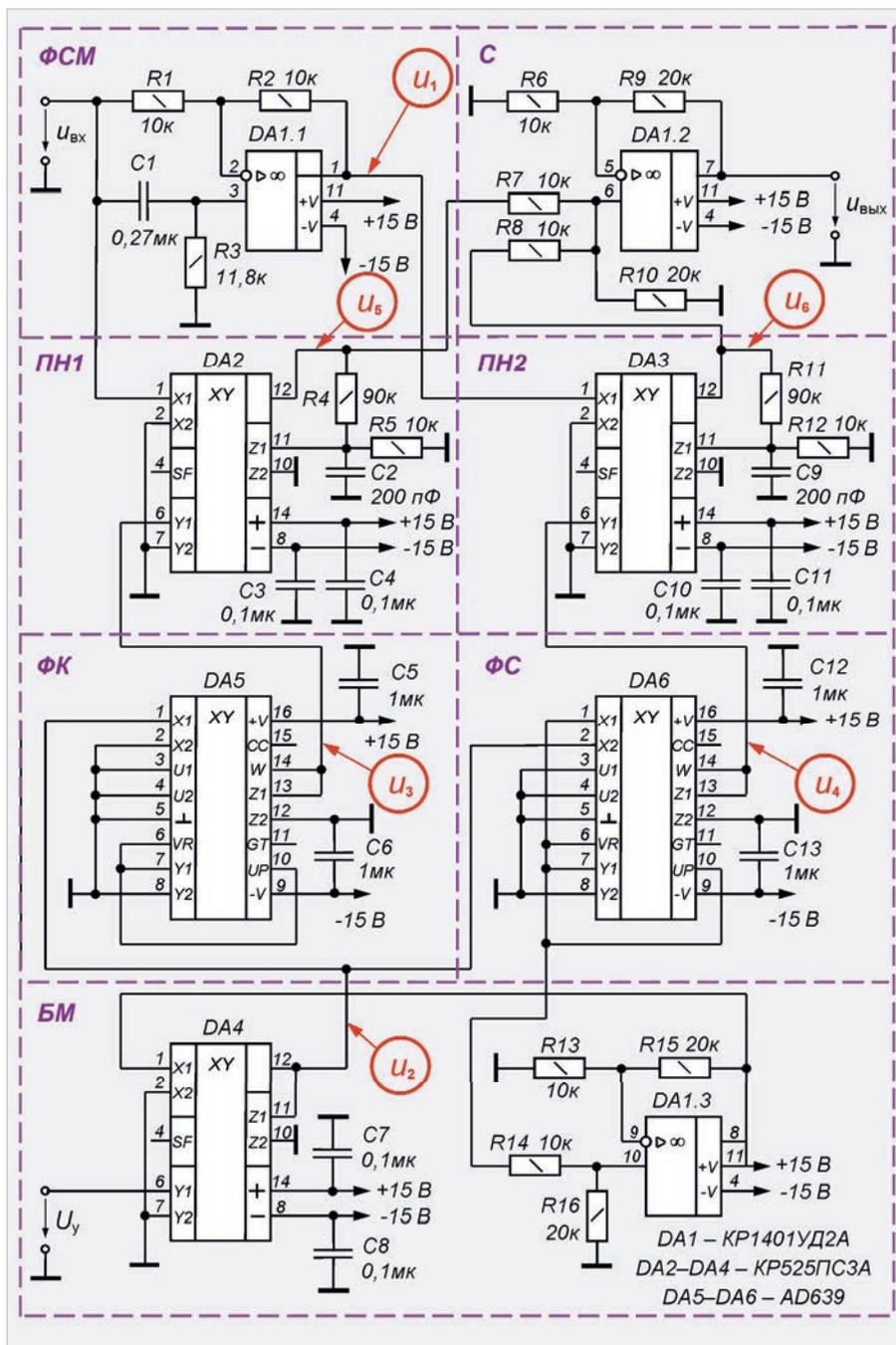


Рис. 2. Принципиальная схема управляемого фазовращателя

$$u_5 = u_{вх} u_3 = (U_{мвх} \sin \omega t) \cos \varphi;$$

$$u_6 = u_1 u_4 = (U_{мвх} \cos \omega t) \sin \varphi.$$

Выходные напряжения  $u_5$  и  $u_6$ , полученные после перемножителей ПН1 и ПН2, суммируются в сумматоре С, на выходе которого и на выходе УФВ формируется напряжение  $u_{вых}$  [7]:

$$u_{вых} = (U_{мвх} \sin \omega t) \cos \varphi + (U_{мвх} \cos \omega t) \sin \varphi = U_{мвх} \sin(\omega t + \varphi).$$

Моделирование УФВ в пакете прикладных программ MATLAB & Simulink показало, что УФВ обеспечивает сдвиг фазы  $\varphi$  входного сигнала от  $-180^\circ$  до  $+180^\circ$ , т.е. в диапазоне углов  $360^\circ$  при изменении напряжения управления  $U_y$  в диапазоне  $\pm 10$  В и единичном

коэффициенте передачи. Величина угла сдвига фазы  $\varphi$  прямо пропорциональна напряжению управления  $U_y$ , поэтому регулировочная характеристика УФВ  $\varphi = f(U_y)$  линейная [7], что упрощает построение различных электронных устройств, работа которых основана на фазовом сдвиге. При этом коэффициент пропорциональности равен  $K_{пр} = 18$  град/В.

Принципиальная схема разработанного УФВ приведена на рис. 2. Схема выполнена на интегральных микросхемах (ИМС): счетверённом ОУ DA1 типа KP1401UD2A, перемножителях напряжений DA2...DA4 типа KP525PC3A и конверторов тригоно-

метрических функций DA5, DA6 типа AD639 [8].

Фазосмещатель ФСМ выполнен на ОУ DA1.1, включённом по схеме фазового фильтра, который сдвигает входное напряжение  $u_{вх}$  на угол  $90^\circ$  в сторону опережения на частоте 50 Гц (рис. 2), для чего необходимо выдерживать соотношение [3]:

$$\varphi = 180^\circ - 2 \arctg(R3C1\omega) = 90^\circ$$

$$\text{или } 2 \arctg(2\pi f R3C1) = 90^\circ,$$

$$\text{тогда } 2\pi f R3C1 = 1. \quad (1)$$

Задавшись ёмкостью конденсатора  $C1 = 0,27$  мкФ, было определено сопротивление резистора R3:

$$R3 = \frac{1}{2\pi f C1} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,27 \cdot 10^{-6}} = 11795,2 \text{ Ом} \approx 11,8 \text{ кОм}.$$

Коэффициент передачи фазосмещателя ФСМ равен единице при равенстве сопротивлений резисторов R1 и R2 [3].

Блок масштабирования БМ выполнен на ИМС перемножителя напряжений DA4 и ОУ DA1.3. В отличие от модели [7], в соответствии с [8] коэффициент преобразования (масштабирования) ИМС AD639 составляет  $K_{пр} = 50$  град/В, а на выводе 6 «VR» формируется опорное напряжение величиной  $U_{оп} = 1,8$  В. Таким образом, чтобы обеспечить угол  $180^\circ$ , это напряжение необходимо увеличить в два раза. Поэтому коэффициент передачи усилителя на ОУ DA1.3 выбран равным 2. В результате на выходе блока масштабирования БМ будет формироваться напряжение  $U_2 = \pm 3,6$  В при изменении напряжения управления  $U_y$  в пределах  $\pm 10$  В, т.е. [9]:

$$u_2 = \frac{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)}{10} + z_2 = \frac{x_1 y_1}{10} = \frac{2U_{оп} \cdot U_y}{10} = \frac{3,6 \cdot U_y}{10} = 0,36 U_y,$$

где  $x_2 = y_2 = z_2 = 0$ , поэтому эти входы DA4 в схеме (рис. 2) подключены к общему проводу.

Формирователь косинуса ФК выполнен на ИМС DA5 типа AD639, включённой по схеме формирователя косинуса согласно [8].

$$u_3 = \cos(K_{пр} u_2) = \cos(50 \cdot 0,36 U_y) = \cos(18 U_y).$$

Формирователь синуса ФС выполнен на ИМС DA6 типа AD639, включённой по схеме формирователя синуса согласно [8].

$$u_4 = \sin(K_{пр} u_2) = \sin(50 \cdot 0,36 U_y) = \sin(18 U_y).$$

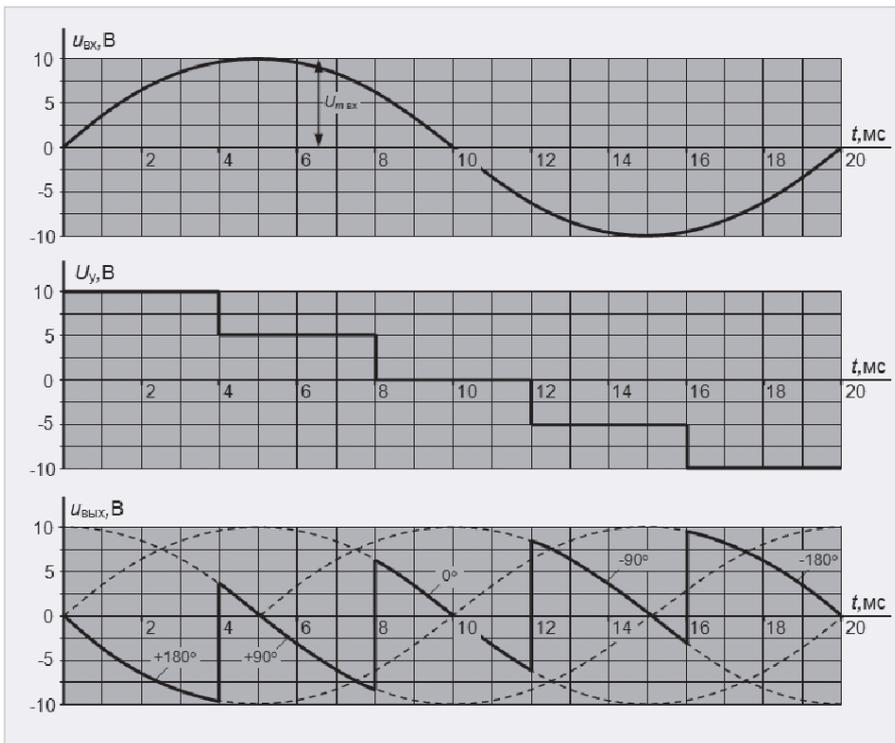


Рис. 3. Осциллограммы напряжений управляемого фазовращателя

Перемножители напряжений ПМ1 и ПМ2 выполнены на интегральных микросхемах ИМС перемножителей DA2 и DA3 типа КР525ПС3А [8]. Коэффициент передачи этих перемножителей единичный, в отличие от стандартного применения. Это обеспечивается использованием внутренних ОУ ИМС перемножителей DA2 и DA3, включённых по схеме неинвертирующих усилителей, которые реализуются введением отрицательной обратной связи при помощи внешних резисторов R4, R5 и R11, R12 соответственно.

На выходах перемножителей DA2 и DA3 формируются напряжения  $u_5$  и  $u_6$  соответственно:

$$u_5 = (x_1 - x_2)(y_1 - y_2) + z_2 = x_1 y_1 = u_{вх} u_3 = (U_{мвх} \sin \omega t) \cos(18U_y);$$

$$u_6 = (x_1 - x_2)(y_1 - y_2) + z_2 = x_1 y_1 = u_1 u_4 = (U_{мвх} \cos \omega t) \sin(18U_y),$$

где  $u_{вх} = U_{мвх} \sin \omega t$ ;  $u_1 = U_{мвх} \cos \omega t$ ;  $x_2 = y_2 = z_2 = 0$ , поэтому эти входы DA2 и DA3 в схеме (рис. 2) подключены к общему проводу.

Напряжения  $u_5$  и  $u_6$  подаются на входы неинвертирующего сумматора С, выполненного на ОУ DA2, имеющего единичный коэффициент передачи. В результате на выходе сумматора С и на выходе УФВ формируется напряжение:

$$u_{вых} = u_5 + u_6 = (U_{мвх} \sin \omega t) \cos(18U_y) + (U_{мвх} \cos \omega t) \sin(18U_y) = U_{мвх} \sin(\omega t + 18U_y) = U_{мвх} \sin(\omega t + \varphi).$$

По разработанной схеме (рис. 2) был создан опытный образец УФВ и проведены его лабораторные исследования, которые показали работоспособность устройства и правильность выбора схемных решений.

На управляющий вход УФВ последовательно подавались уровни напряжений  $U_y$  постоянного тока от  $-10$  В до  $+10$  В и снимались осциллограммы входного  $u_{вх}$  и выходного напряжений  $u_{вых}$ .

На рис. 3 приведены осциллограммы напряжений, полученные в результате исследований опытного образца УФВ.

Из осциллограмм видно, что на первом интервале входного напряжения  $u_{вх}$  от 0 до 4 мс при напряжении управления  $U_y = +10$  В угол сдвига фазы сигнала составляет  $\varphi = +180^\circ$ . На втором интервале входного напряжения  $u_{вх}$  от 4 до 8 мс при напряжении управления  $U_y = +5$  В угол сдвига фазы сигнала составляет  $\varphi = +90^\circ$ . На третьем интервале входного напряжения  $u_{вх}$  от 8 до 12 мс при напряжении управления  $U_y = 0$  В угол сдвига фазы сигнала составляет  $\varphi = 0^\circ$ . На четвёртом интервале входного напряжения  $u_{вх}$  от 12 до 16 мс при напряжении управления  $U_y = -5$  В угол сдвига фазы сигнала составляет  $\varphi = -90^\circ$ . На пятом интервале входного напряжения  $u_{вх}$  от 16 до 20 мс при напряжении управления  $U_y = -10$  В угол сдвига фазы сигнала составляет  $\varphi = -180^\circ$ .

Таким образом, разработанный УФВ позволяет сдвигать фазу  $\varphi$  входного сигнала от  $-180^\circ$  до  $+180^\circ$ , т.е. в диапазоне углов  $360^\circ$  при изменении напряжения управления  $U_y$  от  $-10$  В до  $+10$  В.

Следует отметить, что рабочий диапазон частот разработанного УФВ ограничен промышленной частотой 50 Гц, так как фазосмещатель ФСМ обеспечивает сдвиг фазы входного сигнала на  $90^\circ$  только на этой частоте. Для перестройки УФВ на другую частоту необходимо в ФСМ изменить параметры цепи R3C1 в соответствии с выражением (1). Для расширения рабочего диапазона частот УФВ фазосмещатель ФСМ можно выполнить широкополосным по схеме, приведённой в [10].

## Литература

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 2003. 462 с.
2. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1991. 622 с.
3. Пейтон А.Дж., Воли В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М.: БИНОМ, 1994. 352.
4. Дубровин В.С. Управляемые фазовращатели // Южно-уральский научный вестник. Бийск, 2012. Вып. 2 (2). С. 38–41.
5. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов: учебное пособие. СПб.: Лань, 2010. 608 с.
6. Пат. № 206198 Российская Федерация, МПК G01R 25/04, H03N 11/16, H03N 17/08. Управляемый фазовращатель / Колесников Е.Б. № 2021113412 /28; заявл. 11.05.2021; опубл. 30.08.2021, Бюл. № 25.
7. Колесников Е.Б. Управляемый фазовращатель гармонического сигнала // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 509–517.
8. AD639 Datasheet – Analog Devices. URL: <https://datasheet4u.com/datasheet-pdf/AnalogDevices/AD639/pdf.php?id=145684> (дата обращения: 15.08.2025).
9. Коломбет Е.А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов. М.: Радио и связь, 1991. 376 с.
10. Пат. № 196044 Российская Федерация, МПК G01R 25/04. Устройство сдвига фазы на 90 градусов / Колесников Е.Б. № 2019141469/28; заявл. 12.12.2019; опубл. 14.02.2020, Бюл. № 5.