

# Измерительный преобразователь переменного напряжения в постоянное

Евгений Колесников

Устройство позволяет увеличить быстродействие и точность существующих преобразователей переменного напряжения в постоянное, тем самым повысить точность поддержания параметров технологического процесса, а также эффективность работы средств защиты. Измерительный преобразователь построен на базе аналоговых умножителей напряжения. Область применения измерительного преобразователя – измерение переменного синусоидального напряжения промышленной частоты.

Современное производство невозможно представить без электротехнического оборудования, обеспечивающего заданные параметры технологического процесса. К такому оборудованию относятся различные устройства силовой электроники: выпрямители, инверторы, регуляторы, устройства плавного пуска, преобразователи частоты и др. Поддержание заданных параметров технологического процесса обеспечивается многоконтурными системами подчиненного регулирования, в состав которых входят различные датчики напряжения и тока, которые также используются для защиты силовых полупроводниковых преобразователей от аварийных режимов работы. В большинстве случаев в регуляторах и системах защиты устройств силовой электроники используются сигналы постоянного тока, пропорциональные измеряемой величине. В случае если изме-

ряемой величиной является переменное напряжение первичного датчика напряжения или тока, то возникает необходимость преобразования его переменного напряжения в постоянное. Для этой цели применяются измерительные преобразователи, от быстродействия и точности которых зависит точность поддержания параметров технологического процесса, а также эффективность работы средств защиты, обеспечивающих работоспособность силового оборудования.

Простейшие измерительные преобразователи переменного напряжения в постоянное используют, как правило, полупроводниковые двухполупериодные выпрямители, а для сглаживания пульсаций используются пассивные или активные сглаживающие фильтры [1, 2].

Применение полупроводниковых диодов снижает линейность, а следовательно, и точность преобразо-

вания, особенно в области малых сигналов. А для получения выходного напряжения преобразователя с малыми пульсациями требуются сглаживающие фильтры со значительной постоянной времени, что существенно уменьшает быстродействие. Применение активных выпрямителей [2] несколько повышает линейность и точность преобразования, но не оказывает влияния на быстродействие, которое в значительной степени зависит от постоянной времени фильтра нижних частот, включённого на выходе выпрямителя.

Средства современной электроники позволяют построить быстродействующий преобразователь переменного напряжения в постоянное, обладающий высоким быстродействием, линейностью и точностью.

На рис. 1 приведена структурная схема разработанного измерительного преобразователя переменного напряжения в постоянное [3]. Он содержит фазосмещатель  $\Phi C$ , два квадратора  $KB1$  и  $KB2$ , сумматор  $C$  и блок извлечения квадратного корня  $БИК$ .

Преобразователь работает следующим образом. Измеряемое синусоидальное напряжение переменного тока  $u_{вх}$  подаётся на входы фазосмещателя  $\Phi C$  и квадратора  $KB1$ . На выходе фазосмещателя  $\Phi C$  формируется напряжение  $u_1$  такой же амплитуды и сдвинутое по фазе относительно  $u_{вх}$  на угол  $90^\circ$  в сторону отставания.

На входы квадраторов  $KB1$  и  $KB2$  поступают соответственно напряжения  $u_{вх}$  и  $u_1$ , одинаковые по амплитуде и сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол  $90^\circ$ :

$$u_{вх} = U_{m\text{ вх}} \sin \omega t;$$

$$u_1 = U_{m\text{ вх}} \sin(\omega t + 90^\circ) = U_{m\text{ вх}} \cos \omega t,$$

где  $U_{m\text{ вх}}$  – амплитуда измеряемого входного напряжения.

На выходах квадраторов  $KB1$  и  $KB2$  формируются синусоидальные напряжения  $u_2$ ,  $u_3$  постоянного тока, полученные после возведения в квадрат напряжений соответственно  $u_{вх}$  и  $u_1$ :

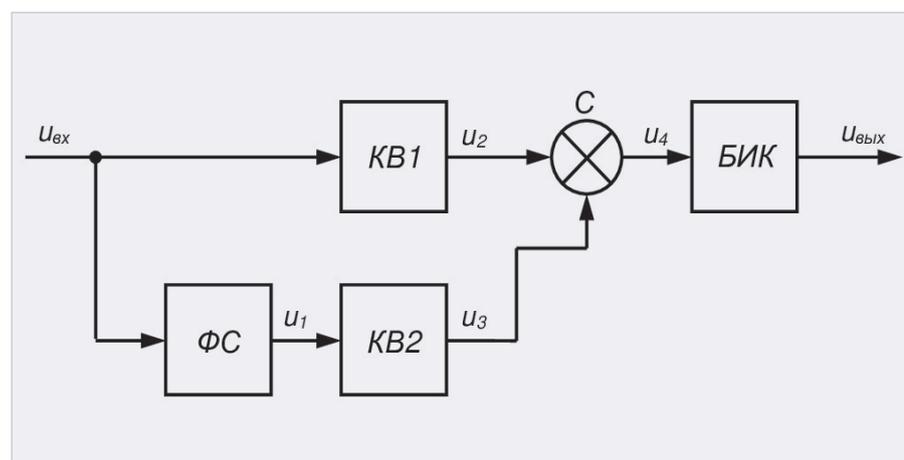


Рис. 1. Структурная схема измерительного преобразователя:  
 $\Phi C$  – фазосмещатель;  $KB1$ ,  $KB2$  – квадраторы 1, 2;  $C$  – сумматор;  
 $БИК$  – блок извлечения квадратного корня

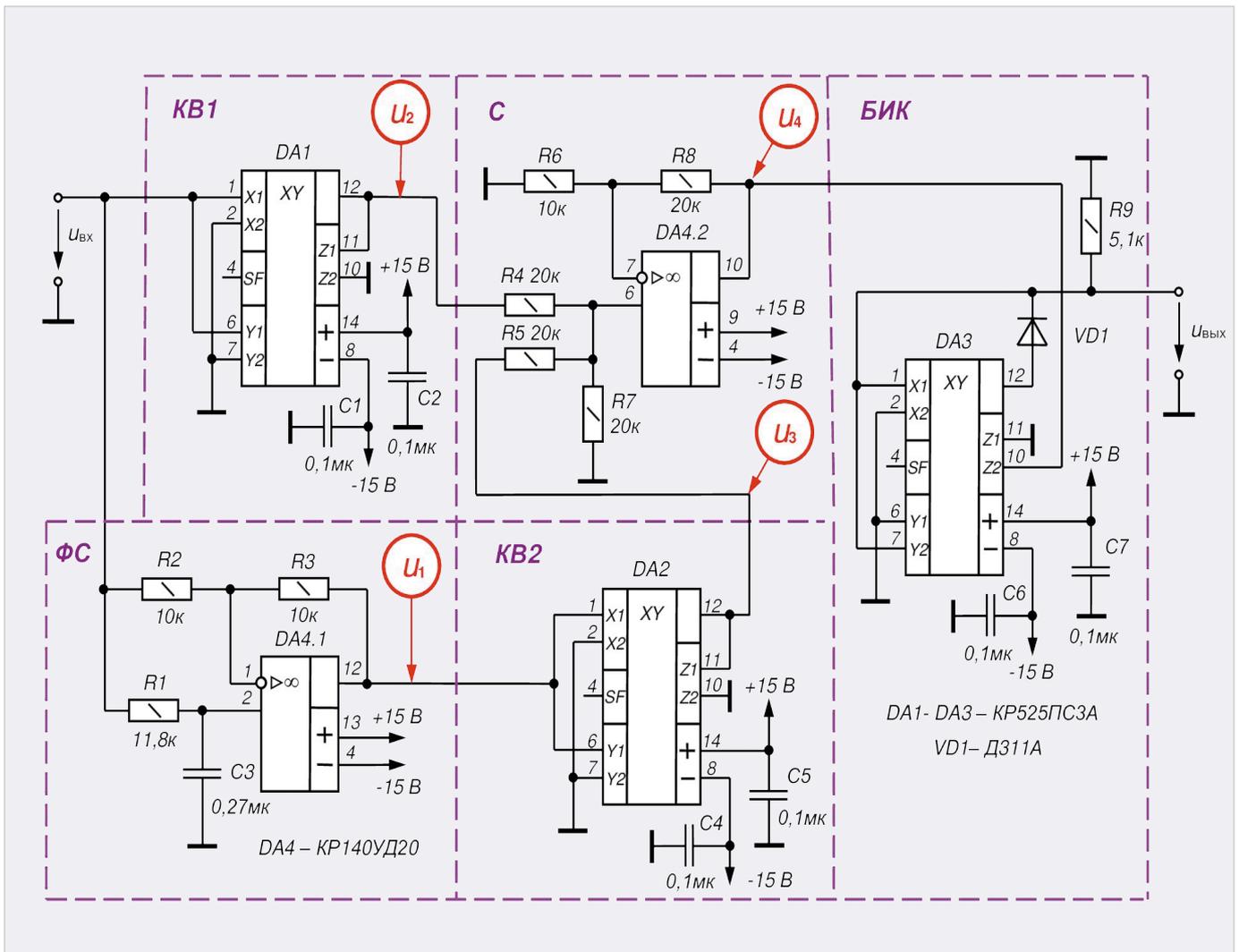


Рис. 2. Принципиальная схема измерительного преобразователя

$$u_2 = u_{вх}^2 = U_{м\ вх}^2 \sin^2 \omega t;$$

$$u_3 = u_1^2 = U_{м\ вх}^2 \cos^2 \omega t.$$

После суммирования напряжений  $u_2$  и  $u_3$  в сумматоре С и преобразований на его выходе имеем постоянное напряжение  $u_4$ :

$$u_4 = u_2 + u_3 = U_{м\ вх}^2 \sin^2 \omega t + U_{м\ вх}^2 \cos^2 \omega t = U_{м\ вх}^2 (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) = U_{м\ вх}^2.$$

После операции извлечения квадратного корня в блоке извлечения квадратного корня БИК на выходе преобразователя формируется напряжение  $U_{ввых}$  постоянного тока:

$$U_{ввых} = \sqrt{U_{м\ вх}^2} = U_{м\ вх} = \sqrt{2}U_{вх}.$$

Из полученного выражения для  $U_{ввых}$  видно, что выходное напряжение  $U_{ввых}$  преобразователя не содержит переменной составляющей напряжения, а его величина равна амплитуде измеряемого входного напряжения  $U_{м\ вх}$ , то есть пропорционально  $U_{вх}$ . Таким образом, квадраторы KB1 и KB2 выполняют роль выпрямителя, а сумматор С совместно с фазосмещателем ФС – роль быстродействующего сглаживающего фильтра.

На рис. 2 приведена принципиальная схема разработанного измерительного преобразователя. На рис. 3 приведены осциллограммы входного  $u_{вх}$  и выходного  $u_{ввых}$  напряжений и напряжений  $u_1$ – $u_4$  в контрольных точках схемы, полученные при ступенчатом воздействии на входе схемы.

Фазосмещатель ФС выполнен на операционном усилителе DA4.1, включённом по схеме фазового фильтра, который сдвигает входное напряжение  $u_{вх}$  на угол 90° в сторону отставания на частоте 50 Гц (рис. 2). Коэффициент передачи фазосмещателя ФС равен единице при равенстве сопротивлений резисторов R2 и R3 [4].

Квадраторы KB1 и KB2 выполнены на интегральных микросхемах перемножителей напряжений DA1 и DA2 типа KP525ПC3A [5], которые выполняют операцию перемножения соответственно двух одинаковых входных сигналов, то есть операцию возведения в квадрат [6]:

$$u_2 = \frac{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)}{10} + z_2 = \frac{x_1 y_1}{10} = \frac{u_{вх} u_{вх}}{10} = \frac{u_{вх}^2}{10} = \frac{U_{м\ вх}^2 \sin^2 \omega t}{10};$$

$$u_3 = \frac{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)}{10} + z_2 = \frac{x_1 y_1}{10} = \frac{u_1 u_1}{10} = \frac{U_{м\ вх}^2 \cos^2 \omega t}{10},$$

где  $u_1 = U_{м\ вх} \cos \omega t$ ,

$x_2 = y_2 = z_2 = 0$ , поэтому эти входы DA1 и DA2 в схеме (рис. 2) подключены к общему проводу.

Схема сумматора С представляет собой двухвходовой неинвертирующий сумматор на операционном усилителе DA4.2. Сопротивления резисторов сумматора С рассчитаны таким образом, что его коэффициент передачи равен единице. На выходе сумматора С формируется напряжение (рис. 2):

$$u_4 = u_2 + u_3 = \frac{U_{м\ вх}^2 \sin^2 \omega t + U_{м\ вх}^2 \cos^2 \omega t}{10} = \frac{U_{м\ вх}^2}{10}.$$

Блок извлечения квадратного корня БИК выполнен на микросхеме перемножителя DA3 типа KP525ПC3A,

который включён по схеме извлечения квадратного корня и выполняет одноимённую операцию [6]:

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{10(z_2 - z_1)} + x_2 = \sqrt{10z_2} = \\ = \sqrt{10u_4} = \sqrt{\frac{10U_{\text{м вх}}^2}{10}} = U_{\text{м вх}} = \sqrt{2}U_{\text{вх}},$$

где  $x_2 = z_1 = 0$ .

Таким образом, исключение из схемы преобразователя фильтра нижних частот, характерного для классических схем преобразователей переменного напряжения в постоянное, позволило существенно повысить быстродействие устройства.

Для разрешающей способности перемножителей КР525ПС3А в 12 мВ [5] динамический диапазон входного сигнала преобразователя составляет приблизительно 60 дБ. Для примера на рис. 3 приведены осциллограммы напряжений при амплитуде входного сигнала 3 В.

Анализ осциллограммы выходного  $u_{\text{вых}}$  напряжения показывает, что время установления  $t_y$  выходного напряжения  $u_{\text{вых}}$  разработанного преобразователя, характеризующее его быстродействие, составляет 0,9 мс, что приблизительно в 6 раз быстрее в сравнении со схемой, основанной на двухполупериодном выпрямлении со сглаживающим фильтром.

Разработанный измерительный преобразователь был использован в устройстве защиты электродвигателя погружного насоса [7] мощностью 11 кВт вместо активного выпрямителя со сглаживающим фильтром. Тем самым повысилась чувствительность защиты от аварийных режимов по току, что позволило предотвратить преждевременный выход из строя дорогостоящего электродвигателя погружного насоса и повысило надёжность водоснабжения из-за сокращения простоя оборудования.

Следует отметить, что рабочий диапазон частот разработанного измерителя ограничен промышленной частотой 50 Гц, так как фазосмещатель ФС смещает фазу входного сигнала на 90° только на этой частоте. Для расширения рабочего диапазона частот фазосмещатель ФС можно выполнить по схеме, приведённой в [8]. Тогда область применения данного измерительного преобразователя можно расширить для применения в частотно-регулируемом электроприводе.

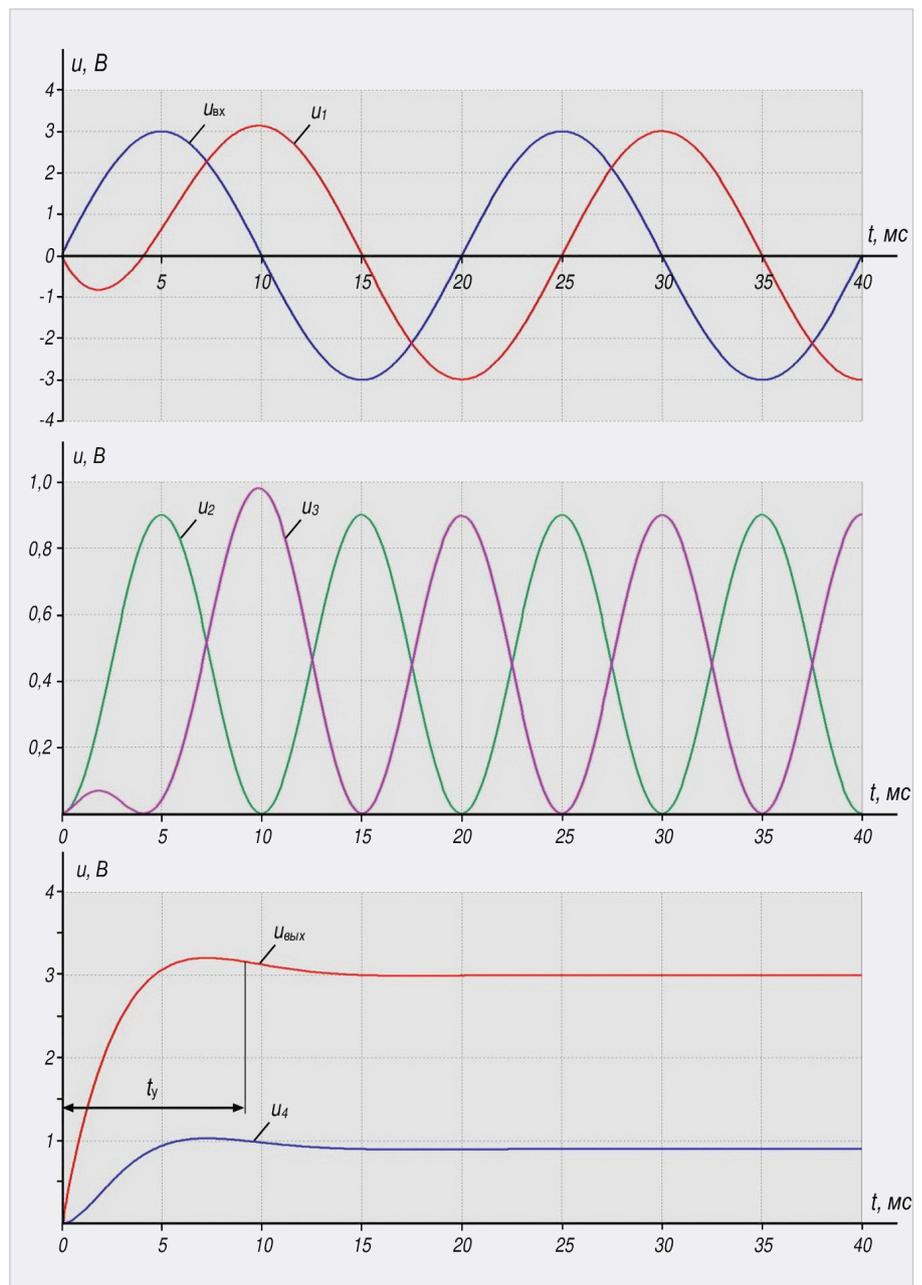


Рис. 3. Осциллограммы работы преобразователя

## Литература

1. Волгин Л.И. Измерительные преобразователи переменного напряжения в постоянное. М.: Советское радио, 1977. 240 с.
2. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1991. 473 с.
3. Пат. № 163230 Российская Федерация, МПК G01R 19/22. Измерительный преобразователь переменного напряжения в постоянное / Колесников Е.Б. № 2016104235/28; заявл. 09.02.2016; опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19.
4. Пейтон А.Дж., Воли В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М.: БИНОМ, 1994. 352 с.
5. Нефедов А.В. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги: справочник. Т. 4. М.: ИП РадиоСофт, 2001. 576 с.
6. Коломбет Е.А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов. М.: Радио и связь, 1991. 376 с.
7. Колесников Е.Б. Устройство управления и защиты электродвигателя погружного насоса // Современная электроника. 2013. № 5. С. 44–51.
8. 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.

