

# ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

---

## ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

---

УДК 621.317.733  
doi:10.21685/2072-3059-2021-1-6

### Измерительные цепи с временным разделением каналов для многомерных объектов измерения

В. П. Арбузов

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
arbuzov\_vp@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Потребность в увеличении количества информации о состоянии технологического процесса привела к необходимости рассмотрения параметрических преобразователей датчиков как многомерных объектов измерения, а следовательно, к созданию измерительных цепей для датчиков с многоэлементной схемой замещения их параметрических преобразователей. Целью работы является рассмотрение принципа действия основных узлов измерительных цепей с фазовым разделением каналов для многомерных датчиков и выбор метода создания цифровой модели напряжения, в которой преобразован иммитанс датчика. *Материалы и методы.* Применение метода фазового разделения каналов в измерительных цепях датчиков позволяет обеспечить не только коррекцию погрешности, обусловленной неидеальностью элементной базы и емкостью кабеля, но и измерение параметров многомерных объектов, а использование метода Прони для построения цифровой модели выходного напряжения активного преобразователя сокращает время преобразования до периода тест-сигнала за счет уменьшения количества отсчетов. *Результаты и выводы.* Для получения дискретной модели выходного напряжения активного преобразователя предложено использовать метод Прони, позволяющий при ограниченном количестве отсчетов получить дискретную модель аналогового сигнала, при этом степень адекватности полученной модели определяется разрядностью аналого-цифрового преобразования, количеством отсчетов и их длительностью, шагом и равномерностью дискретизации, методом интерполяции или экстраполяции, используемым для получения цифровой модели.

**Ключевые слова:** измерительная цепь, фазовое разделение каналов, погрешность, многомерные объекты, дискретная модель аналогового сигнала, метод Прони

**Для цитирования:** Арбузов В. П. Измерительные цепи с временным разделением каналов для многомерных объектов измерения // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 1. С. 63–75. doi:10.21685/2072-3059-2021-1-6

---

© Арбузов В. П., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

## Time division measurement circuits for multidimensional measurement objects

V.P. Arbuzov

Penza State University, Penza, Russia

arbuzov\_vp@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The need to increase the amount of information about the state of the technological process has led to the need to consider parametric transducers of sensors as multidimensional measurement objects, and therefore, to create measurement circuits for sensors with a multi-element replacement scheme for their parametric transducers. The purpose of the research is to consider the principle of operation of the main components of measuring circuits with phase separation of channels for multidimensional sensors and to choose a method for creating a digital model of the voltage into which the immitance of the sensor is converted. *Materials and methods.* The use of the method of phase separation of channels in the measuring circuits of sensors allows not only to correct the error caused by the imperfection of the element base and cable capacity, but also to measure the parameters of multidimensional objects. The use of the Prony method to build a digital model of the output voltage of an active converter reduces the conversion time to the test signal period by reducing the number of samples. *Results and conclusions.* To obtain a discrete model of the output voltage of the active converter, it is proposed to use the Prony method. This method allows obtaining a discrete model of an analog signal with a limited number of samples. The degree of adequacy of the obtained model is determined by the digit capacity of the analog-to-digital conversion, the number of samples and their duration, the step and uniformity of sampling, by the interpolation or extrapolation method used to obtain the digital model.

**Keywords:** measuring circuit, phase separation of channels, error, multidimensional objects, discrete model of analog signal, Prony method

**For citation:** Arbuzov V.P. Time division measurement circuits for multidimensional measurement objects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;1:63–75. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-1-6

### Введение

Схема замещения большинства параметрических преобразователей датчиков имеет сложную, многоэлементную схему, параметры которой связаны с конструкцией датчика, с измеряемой величиной и с влияющими на датчик факторами. Кроме того, параметрический преобразователь, входящий в состав измерительной цепи, подключается к ней с помощью кабеля связи, который, как правило, также имеет сложную схему замещения, значения параметров которой обычно превосходят значения информативных параметров датчика. Параметрические преобразователи (ПП) датчиков концентрации, влажности, солености, качества сырья и готовой продукции имеют последовательно-параллельную или параллельно-последовательную ( $R, C$  или  $R, L$ ) схему замещения в виде трехэлементного нерезонансного двухполюсника, причем значения параметров этих двухполюсников или их композиция определяют значения одного или нескольких выходных сигналов датчика. Для исключения влияния параметров кабеля связи на результат преобразования информативного параметра обычно используют структурные методы повышения точности, среди которых наиболее оптимальным является метод фазо-

вого разделения каналов преобразования параметров рабочего и опорного элементов датчика. Согласно этому методу разделение каналов обеспечивается сдвигом фаз напряжений каналов, и поэтому преобразование искомым параметров осуществляется одновременно, а следовательно, фазовое разделение каналов, повышая точность преобразования, не вносит дополнительной инерционности в процесс преобразования информативного параметра [1].

### Многомерные объекты

Если у параметрического преобразователя датчика несколько информативных параметров, то такой датчик представляет собой многомерный объект, и его измерительная цепь должна обеспечить раздельное измерение или раздельный отсчет каждого из его информативных параметров, независимо от параметров кабеля связи. Например, схема замещения квазидифференциального емкостного датчика давления представляет собой два конденсатора  $C_x$  и  $C_0$ , имеющих общую точку (рис. 1,а) [2]. Информативным параметром в этом случае может быть как отношение емкостей конденсаторов  $C_0 / C_x$ , так и относительное приращение емкости рабочего конденсатора  $(C_x - C_0) / C_x$ . При этом изменение значения  $C_x$  обусловлено не только изменением давления, но и изменением влияющих факторов, в то время как емкость опорного конденсатора  $C_0$  зависит только от внешних воздействий и не зависит от изменения значения измеряемой величины.

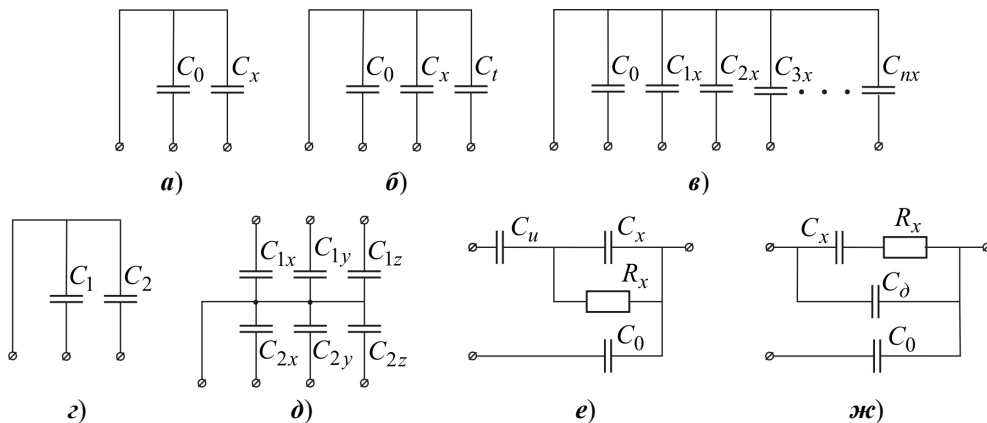


Рис. 1. Примеры схем замещения емкостных ПП датчиков

Схема замещения высокотемпературного емкостного датчика давления с термозависимой емкостью  $C_t$  имеет три конденсатора:  $C_x$ ,  $C_0$  и  $C_t$  (рис. 1,б) [2], причем емкость  $C_t$  используется для коррекции температурной погрешности. Схема замещения бесконтактного многосекционного датчика толщины диэлектрических материалов приведена на рис. 1,в, где  $C_0$  – это опорная емкость датчика, значение которой зависит от диэлектрической постоянной исследуемого материала, так же как и рабочие емкости [3]. Дифференциальная конструкция параметрического преобразователя, например гироскопа, имеет схему замещения, которая состоит из двух рабочих конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  (рис. 1,г) [4, 5], значение емкости одного из которых увели-

чивается, а другого на столько же уменьшается при изменении значения измеряемой датчиком величины. Такую же схему замещения имеют практически все емкостные акселерометры, выполненные по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) [6]. На рис. 1, *д* приведена схема замещения ПП гироскопа *RR* типа, характерной особенностью которой является шина для дифференциальных чувствительных элементов по каждой оси гироскопа [7].

Параметрический преобразователь емкостного датчика для измерения диэлектрической проницаемости бензина имеет схему замещения, приведенную на рис. 1, *е* [8], которая состоит из трех элементов:  $C_u$  – емкость изоляции,  $R_x$  – сопротивление потерь в топливе,  $C_x$  – рабочая емкость датчика. Такую же схему замещения имеет датчик для измерения концентрации растворов электролитов и уровня жидкостей [9], но в каждом конкретном случае датчик имеет информативные параметры (один или несколько), свойственные используемому методу преобразования измеряемой величины в параметры схемы замещения датчика.

### Структурная схема измерительной цепи с фазовым разделением каналов

На рис. 2 приведена структурная схема измерительной цепи, состоящая из блока разделения каналов (БРК), параметрического преобразователя датчика (ПП), кабеля связи (КС), активного преобразователя (АП) и устройства обработки сигналов (УОС). Блок разделения каналов формирует напряжения тест-сигналов  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ , функции которых составляют ортогональную систему функций или систему базисных функций измерительной цепи.

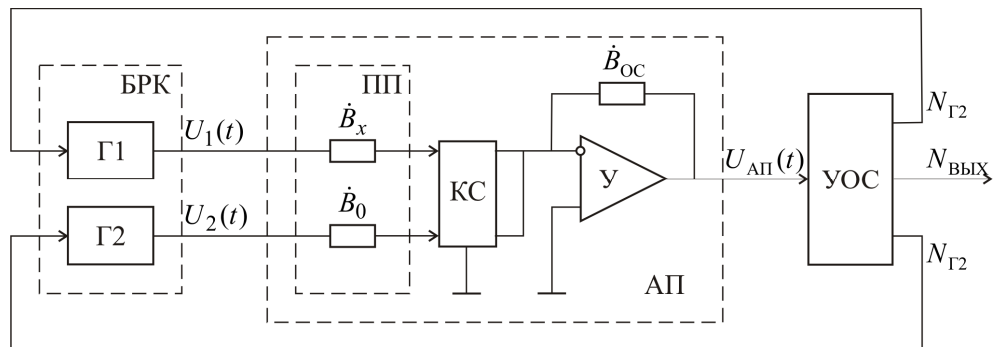


Рис. 2. Структурная схема измерительной цепи с фазовым разделением каналов

Гармонические составляющие этих напряжений формируют ось системы координат, в которой осуществляется разделение каналов преобразования параметров иммитансов рабочего  $\dot{B}_x$  и опорного  $\dot{B}_0$  элементов датчика соответственно, причем в зависимости от значения координатного угла  $\varphi$  система координат может быть как прямоугольная  $\varphi = \pm\pi/2$ , так и косоугольная  $\varphi \neq \pi/2$ . Напряжения  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  поступают на вход активного преобразователя, выполняющего преобразование выходных пассивных электриче-

ских величин ПП датчика  $\dot{B}_x$  и  $\dot{B}_0$  в активные составляющие выходного напряжения АП  $U_{АП}(t)$ . Кабель связи, входящий в состав активного преобразователя, обеспечивая подключение иммитансов датчика к входу операционного усилителя У, шунтирует его вход своей емкостью и тем самым приводит к погрешности. Иммитанс  $\dot{B}_{OC}$  служит для создания «виртуальной земли» на входе операционного усилителя. В результате этого выходное напряжение активного преобразователя представляет собой сумму из двух составляющих, каждая из которых пропорциональна напряжению тест-сигнала  $U_1(t)$  или  $U_2(t)$ , причем коэффициентами пропорциональности являются отношения иммитансов, участвующих в каждом из преобразований. Погрешность указанных преобразований вызвана неидеальностью операционного усилителя, а именно конечным значением его коэффициента усиления, и входит с одинаковым весом в результат каждого преобразования, что позволяет исключить ее за счет логотрической коррекции. Устройство обработки сигналов, во-первых, формирует сигналы управления работой БРК  $N_{Г1}$  и  $N_{Г2}$ ; во-вторых, в системе координат, сформированной тест-сигналами  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ , раскладывает выходное напряжение активного преобразователя  $U_{АП}(t)$  на указанные выше составляющие; в-третьих, вычисляет отношение выделенных составляющих; в-четвертых, формирует выходной сигнал датчика  $N_{ВЫХ}$ .

#### Измерительные цепи датчиков с многомерным параметрическим преобразователем

Если схема замещения ПП датчика содержит два и более элементов, а каждый из них несет информацию о разных параметрах исследуемого процесса, то ПП имеет несколько информативных параметров, а датчик для измерительной цепи является многомерным объектом. В этом случае генераторы Г1 и Г2 должны формировать систему базисных функций, описывающую тест-сигналы [10]:

$$\begin{cases} U_1(t) = \sum_{i=1}^n U_{1i} \sin \omega_i t, \\ U_2(t) = \sum_{i=1}^n U_{2i} \sin(\omega_i t + \varphi_i), \end{cases} \quad (1)$$

где  $U_{1i}$  и  $U_{2i}$  – амплитуды гармонических составляющих напряжений тест-сигналов;  $\varphi_i$  – фазовый сдвиг напряжения  $U_{2i}(t)$  относительно напряжения  $U_{1i}(t)$ ;  $n$  – количество гармоник составляющих напряжений  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ , причем количество гармоник  $n$  определяется количеством неизвестных параметров иммитансов  $\dot{B}_x$  рабочего элемента датчика [11, 12].

Из выражения (1) следует, что функции базисной системы измерительной цепи состоят из элементарных функций  $\{\sin \omega_i t, \sin(\omega_i t + \varphi_i)\}$ ,

причем  $U_1(t)$  содержит только составляющие  $\sin \omega_i t$ , а  $U_2(t)$  – только  $\sin(\omega_i t + \varphi_i)$ , т.е.

$$\begin{cases} U_1(t) = U_{1_1} \sin \omega_1 t + U_{1_2} \sin \omega_2 t + U_{1_3} \sin \omega_3 t + \dots, \\ U_2(t) = U_{2_1} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + U_{2_2} \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + U_{2_3} \sin(\omega_3 t + \varphi_3) + \dots \end{cases} \quad (2)$$

В результате этого функции, описывающие напряжения тест-сигналов  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ , представляют собой совокупность систем базисных функций, каждая из которых описывает составляющую тест-сигналов, на одной из входящих в них частоте:

$$\begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} U_{1_1}(t) = U_{1_1} \sin \omega_1 t, \\ U_{2_1}(t) = U_{2_1} \sin(\omega_1 t + \varphi_1), \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} U_{1_2}(t) = U_{1_2} \sin \omega_2 t, \\ U_{2_2}(t) = U_{2_2} \sin(\omega_2 t + \varphi_2), \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} U_{1_3}(t) = U_{1_3} \sin \omega_3 t, \\ U_{2_3}(t) = U_{2_3} \sin(\omega_3 t + \varphi_3), \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \dots \\ \dots \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} U_{1_n}(t) = U_{1_n} \sin \omega_n t, \\ U_{2_n}(t) = U_{2_n} \sin(\omega_n t + \varphi_n). \end{array} \right. \end{cases} \quad (3)$$

Эти напряжения поступают на параметрический преобразователь, подключенный кабелем связи к входу усилителя, который формирует выходное напряжение активного преобразователя  $U_{АП}(t)$ :

$$U_{АП}(t) = [U_1(t) \cdot K_1 + U_2(t) \cdot K_2](1 + \gamma_M),$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты передачи преобразования иммитансов рабочего  $\dot{B}_x$  и опорного  $\dot{B}_0$  элементов ПП датчика соответственно;  $\gamma_M$  – погрешность преобразования пассивных величин  $\dot{B}_x$  и  $\dot{B}_0$  в активную величину  $U_{АП}(t)$ .

Поскольку тест-сигналы состоят из суммы сигналов, то выходное напряжение активного преобразователя состоит из суммы результатов преобразований (напряжений  $U_{АП_i}(t)$ ) на каждой из частот базисной системы:

$$\begin{aligned} U_{АП}(t) \cdot (1 + \gamma_M) = & U_{АП_1}(t) \cdot (1 + \gamma_{M_1}) + U_{АП_2}(t) \cdot (1 + \gamma_{M_2}) + \\ & + U_{АП_3}(t) \cdot (1 + \gamma_{M_3}) + \dots + U_{АП_n}(t) \cdot (1 + \gamma_{M_n}), \end{aligned}$$

или

$$U_{\text{АП}}(t) = \sum_{i=1}^n U_{\text{АП}_i}(t) \cdot (1 + \gamma_{M_i}), \quad (4)$$

где  $\gamma_{M_i}$  – погрешность преобразования пассивных величин  $\dot{B}_x$  и  $\dot{B}_0$  в активную величину  $U_{\text{АП}_i}(t)$  на каждой частоте тест-сигнала.

Результат преобразования отношения пассивных величин  $\dot{B}_x$  к  $\dot{B}_0$  в активную величину – выходное напряжение активного преобразователя (4) – поступает на вход устройства обработки сигналов, которое физически или аналитически выделяет из этого напряжения каждую из гармоник  $U_{\text{АП}_i}(t)$ , являющихся результатами преобразования отношения  $\dot{B}_x$  и  $\dot{B}_0$  на каждой частоте тест-сигнала, т.е. выполняется операция фильтрации. В процессе фильтрации последовательно во времени или одновременно УОС либо выделяет из напряжения  $U_{\text{АП}}(t)$  каждое напряжение  $U_{\text{АП}_i}(t)$  в отдельности, либо одновременно вычисляет значения амплитуд и фаз этих напряжений. В обоих случаях каждое выходное напряжение фильтра  $U_{\Phi_i}$  имеет вид

$$U_{\Phi_i}(t) = \begin{cases} U_{\text{АП}_i}(t) & \text{при } \omega = \omega_i, \\ 0 & \text{при } \omega \neq \omega_i. \end{cases} \quad (5)$$

Как при аналоговой, так и при цифровой фильтрации выражение (5) характерно для идеального фильтра. Поскольку  $U_{\Phi_i}(t)$  представляет собой или синусоидальное напряжение известной частоты или его цифровую модель, а в процессе фильтрации допускается ошибка как по модулю, так и по фазе, то погрешность фильтрации на каждой частоте представляет собой вектор, который влияет на результат разложения выделенного фильтром напряжения в соответствующем его частоте базисе (3). При разложении выходного напряжения фильтра в базисе с координатным углом  $\pm\pi/2$  векторная погрешность составляющих достаточно хорошо изучена и может быть скорректирована одним из известных методов [13]. В то же время, если хотя один из координатных углов базисов не равен  $\pi/2$ , то все операции в УОС должны выполняться «в цифровом виде» и, следовательно, в УОС первоначально необходимо преобразовать непрерывный сигнал (выходное напряжение активного преобразователя) в дискретный сигнал. Поскольку совокупность систем базисных функций разрабатывается на стадии проектирования измерительной цепи датчика, то для обработки выходного сигнала активного преобразователя в УОС в цифровом виде не следует использовать координатные углы, кратные  $\pi/2$ , а первым преобразованием, которое будет выполняться в УОС, является аналого-цифровое преобразование (АЦП) выходного напряжения активного преобразователя, результатом которого является дискретная модель аналогового напряжения  $U_{\text{АП}}(t)$ .

После того как определена дискретная модель выходного напряжения активного преобразователя, из нее следует выделить дискретные модели выходного напряжения активного преобразователя для каждой из  $n$  частот тест-

сигнала. На следующем этапе УОС каждую выделенную дискретную модель раскладывают на составляющие, пропорциональные иммитансам рабочего и опорного элементов, в системе координат, образованной слагаемыми тест-сигналов, которые соответствуют дискретной модели частоты.

Имея цифровые модели описанных выше составляющих для каждой части тест-сигнала, можно определить искомые параметры датчика в соответствии с многоэлементной схемой замещения его параметрического преобразователя.

### **Источники возникновения погрешности измерительных цепей многомерных объектов**

Среди основных источников возникновения погрешности преобразования параметров многомерных объектов следует отметить погрешность, вносимую кабелем, неидеальность операционного усилителя, преобразование непрерывной величины  $U_{АП}(t)$  в дискретную величину, цифровую фильтрацию по методу Прони и разложение выделенных результатов преобразований отношений иммитансов рабочего и опорного элементов датчика в соответствующем им частотном базисе.

Фазовое разделение каналов позволяет скорректировать погрешности (теоретически), вносимые кабелем, неидеальностью усилителя, и погрешность нелинейности аналого-цифрового преобразования  $U_{АП}(t)$ . Особое место в работе измерительной цепи занимает процесс разложения периодических сигналов сложной формы  $U_{АП}(t)$  на гармонические составляющие методом Прони или Прони-фильтрацией [14]. Применение именно Прони-фильтрации в рассматриваемых измерительных цепях обусловлено конечным значением дискрет для решения задачи создания цифровой модели  $U_{АП}(t)$ , состоящей из цифровых моделей входящих в  $U_{АП}(t)$  гармоник. Конечное количество дискрет (по две на каждую гармонику [14]) обеспечивает выделение составляющих в течение не более периода сложного сигнала, причем методическая погрешность такого преобразования зависит как от количества точек дискретизации, так и от количества гармоник  $U_{АП}(t)$  или от их соотношения.

Инструментальная погрешность определения цифровой модели выходного напряжения активного преобразователя определяется длительностью и количеством отсчетов, шагом дискретизации и методом интерполяции или экстраполяции, используемым для получения цифровой модели  $U_{АП}(t)$  в виде суммы цифровых моделей каждой гармоники.

На примере датчика уровня светлых нефтепродуктов рассмотрим процессы преобразования сигналов в измерительной цепи многомерного датчика. На рис. 3 приведен пример активного преобразователя измерительной цепи такого датчика.

Емкостной параметрический преобразователь соединен с активным преобразователем измерительной цепи кабелем, паразитные емкости которого  $C_{К1} - C_{К3}$  шунтируют выходные сопротивления генераторов тест-сигналов (рис. 1) и входное сопротивление операционного усилителя У. Если первые две паразитные емкости кабеля практически не влияют на погрешность датчика, то емкость  $C_{К3}$  вносит погрешность в преобразование отношения им-



митансов рабочего и опорного элементов датчика в активную величину, для ее исключения в измерительной цепи организуют фазовое разделение каналов преобразования  $\dot{B}_x$  и  $\dot{B}_0$ . Рабочий элемент параметрического преобразователя имеет трехэлементную параллельно-последовательную нерезонансную схему замещения, состоящую из сопротивления  $R_1$  и емкостей  $C_2$  и  $C_3$ , которые несут информацию о параметрах и уровне контролируемого нефтепродукта [8, 9]. Опорный элемент представляет собой емкость  $C_0$ , значение которой определяется геометрическими размерами датчика, диэлектрической проницаемостью межэлектродной среды и влияющими факторами, например температурой. Изменяясь под действием влияющих факторов, так же как и емкости рабочего элемента датчика, емкость  $C_0$  является опорной для данного датчика. Выходное напряжение активного преобразователя равно:

$$U_{АП}(t) = U_1(t) \frac{\omega C_2 C_3 R_1 - j(C_2 + C_3)}{C_{OC}(\omega C_2 R_1 - j)} + U_2(t) \frac{C_0}{C_{OC}}. \quad (6)$$

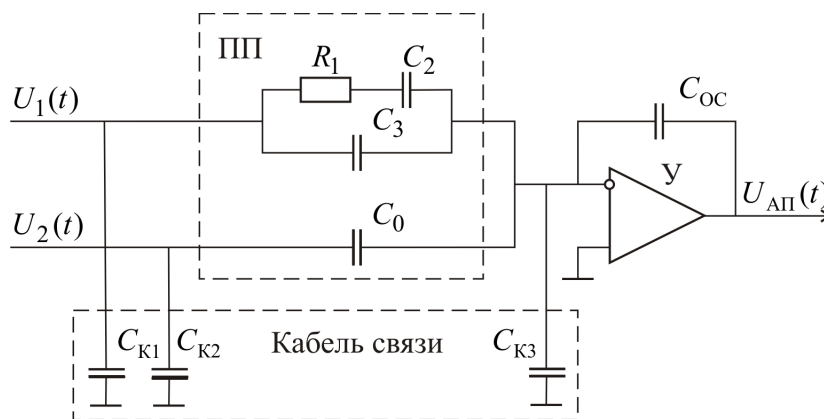


Рис. 3. Активный преобразователь измерительной цепи многомерного датчика

По команде с микропроцессора, входящего в состав УОС, устройство выборки и хранения осуществляет выборку из выходного напряжения активного преобразователя, а АЦП преобразует это напряжение в код  $N_{АП}(t)$ , который поступает на вход цифрового фильтра. Время выборки определяется тактовой частотой АЦП, а их количество зависит как от метода вычисления параметров цифровой модели выходного напряжения активного преобразователя, так и от метода измерения параметров многомерных объектов (в рассматриваемом случае трехэлементного нерезонансного двухполюсника).

Полученные дискретные значения выходного напряжения активного преобразователя запоминаются и поступают на вход фильтра, в основе принципа действия которого лежит метод Прони, позволяющий при известном значении частоты синусоидального напряжения определить значения амплитуды и фазы по двум мгновенным значениям сложного сигнала [14]. Фактически фильтр представляет собой программу, которую выполняет микропроцессор, реализуя функцию преобразования цифрового фильтра (5).

Поскольку схема замещения параметрического преобразователя рассматриваемого датчика содержит три неизвестных параметра, то тест-

сигналы состоят из трех гармоник и, следовательно, исходными данными для работы фильтра по методу Прони являются шесть дискретных значений выходного напряжения активного преобразователя (по два на каждую гармонику) в моменты времени  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$  и  $t_6$ . Моменты дискретизации выбираются таким образом, чтобы за период каждой гармоники тест-сигнала осуществлялось не менее двух дискретизаций. Поскольку значения частот гармоник  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  выбираются из условия максимальной чувствительности активного преобразователя к конкретному параметру датчика, то указанная выше дискретизация, как правило, неравномерная. С учетом полученных дискретных значений и на основе выражения (6) составим систему уравнений:

$$\begin{cases} U_{АП1}(t_1) = U_1(t_1) \frac{\omega C_2 C_3 R_1 - j(C_2 + C_3)}{\omega C_2 C_{OC} R_1 - j C_{OC}} + U_2(t_1) \frac{C_0}{C_{OC}}, \\ U_{АП}(t_2) = U_1(t_2) \frac{\omega C_2 C_3 R_1 - j(C_2 + C_3)}{\omega C_2 C_{OC} R_1 - j C_{OC}} + U_2(t_2) \frac{C_0}{C_{OC}}, \\ U_{АП}(t_3) = U_1(t_3) \frac{\omega C_2 C_3 R_1 - j(C_2 + C_3)}{\omega C_2 C_{OC} R_1 - j C_{OC}} + U_2(t_3) \frac{C_0}{C_{OC}}, \\ U_{АП}(t_4) = U_1(t_4) \frac{\omega C_2 C_3 R_1 - j(C_2 + C_3)}{\omega C_2 C_{OC} R_1 - j C_{OC}} + U_2(t_4) \frac{C_0}{C_{OC}}, \\ U_{АП}(t_5) = U_1(t_5) \frac{\omega C_2 C_3 R_1 - j(C_2 + C_3)}{\omega C_2 C_{OC} R_1 - j C_{OC}} + U_2(t_5) \frac{C_0}{C_{OC}}, \\ U_{АП}(t_6) = U_1(t_6) \frac{\omega C_2 C_3 R_1 - j(C_2 + C_3)}{\omega C_2 C_{OC} R_1 - j C_{OC}} + U_2(t_6) \frac{C_0}{C_{OC}}. \end{cases} \quad (7)$$

Результатом решения уравнений (7) является цифровая модель выходного напряжения активного преобразователя (4), состоящая из моделей выходного напряжения активного преобразователя на каждой из гармоник тест-сигналов:  $U_{АП1}(t)$ ,  $U_{АП2}(t)$  и  $U_{АП3}(t)$ , которые представляют собой отношения иммитанса рабочего элемента датчика к иммитансу опорного элемента.

Для нахождения искомых параметров датчика необходимо решить систему уравнений, состоящую из найденных ранее моделей результатов преобразования параметров датчика на частотах тест-сигнала:

$$\begin{cases} U_{АП1}(t) = U_{m1} \sin(\omega_1 t + \varphi_1), \\ U_{АП2}(t) = U_{m2} \sin(\omega_2 t + \varphi_2), \\ U_{АП3}(t) = U_{m3} \sin(\omega_3 t + \varphi_3), \end{cases}$$

относительно параметров схемы замещения рабочего элемента параметрического преобразователя датчика  $C_1$ ,  $C_2$  и  $R_1$ . Выходной сигнал датчика формируется в соответствии с заданными соотношениями между параметрами схемы замещения  $C_1$ ,  $C_2$  и  $R_1$ .

Аналогичную схему замещения имеет параметрический преобразователь датчика солености товарной нефти и нефтепродуктов.

### Заключение

Применение фазового разделения каналов в измерительных цепях датчиков позволяет обеспечить не только коррекцию погрешности, обусловленной емкостью кабеля, но измерение параметров многомерных объектов. Для получения дискретной модели выходного напряжения активного преобразователя по методу Прони достаточно ограниченного количества отсчетов, при этом степень адекватности полученной дискретной модели аналоговому напряжению определяется разрядностью аналого-цифрового преобразования, количеством отсчетов и их длительностью, шагом и равномерностью дискретизации, методом интерполяции или экстраполяции, используемым для получения цифровой модели.

### Список литературы

1. Arbuzov V. P., Larkin S. E., Mishina M. A. Phase separation of sensor measurement circuit channels // *Measurement Techniques*. 2013. Vol. 55, № 11. С. 1247–1251. doi:10.1007/s11018-013-0115-3
2. Арбузов В. П., Мишина М. А. Коррекция температурной погрешности емкостных датчиков давления // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2017. № 3. С. 94–105. doi:10.21685/2072-3059-2017-3-8
3. Арбузов В. П., Водовскова П. Н., Мишина М. А., Щербаков М. А. Измерение и контроль толщины диэлектрических материалов // *Датчики и системы*. 2014. № 10. С. 29–33.
4. Распопов В. Я. Микромеханические приборы : учеб. пособие. М. : Машиностроение, 2007. 400 с.
5. Люкшонков Р. Г., Моисеев Н. В. Дифференциальный емкостной датчик перемещений с дополнительной информацией о зазоре // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. 2011. № 4. С. 67–72.
6. Xie H. Gyroscope and micromirror design using vertical axis CMOS-MEMS actuation and sensing. Carnegie Mellon University, 2002. 246 p.
7. Некрасов Я. А., Беляева Т. А., Беляев Я. В., Багаева С. В. Электрические схемы емкостных датчиков микромеханического гироскопа RR-типа // *Научное приборостроение*. 2008. Т. 18, № 1. С. 91–97.
8. Поляков С. А., Волков Б. Р., Иванов М. А. Разработка измерительного преобразователя для прибора диэлькометрического контроля бензина // *Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и в научных исследованиях ИАМП-2013 : сб. ст. конф. Бийск, 2013. С. 95–97.*
9. Минаев И. Г., Мастепаненко М. А. Емкостный способ измерения уровня электропроводных и диэлектрических жидкостей // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2011. № 5. С. 52–55.
10. Arbuzov V. P., Mishina M. A. System of basis functions for the measurement circuit of a sensor with temporally separated channels // *Measurement Techniques*. 2014. Vol. 55, № 9. С. 978–983. doi:10.1007/s11018-012-0085-x
11. Arbuzov V. P., Mishina M. A., Vodovskova P. N. The use of phase division of the channels of measuring circuits to measure the parameters of multidimensional objects // *Measurement Techniques*. 2014. Vol. 57, № 6. С. 621–626. doi:10.1007/s11018-014-0508-y
12. Арбузов В. П., Мишина М. А., Балашова И. Ю., Ларкин С. Е., Водовскова П. Н. Определение параметров многомерных объектов // *Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. XXXII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2017. С. 277–281.*

13. Кузнецов Е. Н. Структурно-алгоритмические методы повышения точности измерения параметров электрических цепей : монография. Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2007. 171 с.
14. Митрофанов Г., Прийменко В. Основы и приложения метода Прони-фильтрации // Технологии сейсморазведки. 2011. № 3. С. 93–108.
15. Arbuzov V. P., Kalinina M. A. Piecewise continuous test signals in measuring circuits with time division multiplexing. Moscow. Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020. Proceedings. 2020. С. 9067432 doi:10.1109/MWENT47943.2020.9067432

### References

1. Arbuzov V.P., Larkin S.E., Mishina M.A. Phase separation of sensor measurement circuit channels. *Measurement Techniques*. 2013;55(11):1247–1251. doi:10.1007/s11018-013-0115-3
2. Arbuzov V.P., Mishina M.A. Correction of the temperature error of capacitive pressure sensors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;3:94–105. doi:10.21685/2072-3059-2017-3-8 (In Russ.)
3. Arbuzov V.P., Vodovskova P.N., Mishina M.A., Shcherbakov M.A. Measurement and control of the thickness of dielectric materials. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2014;10:29–33. (In Russ.)
4. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory: ucheb. posobie = Micromechanical devices: teaching aid*. Moscow: Mashinostroenie, 2007:400. (In Russ.)
5. Lyukshonkov R.G., Moiseev N.V. Differential capacitive displacement transducer with additional clearance information. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki = Scientific and engineering bulletin of Saint Petersburg State University of information technology, mechanics and optics*. 2011;4:67–72. (In Russ.)
6. Xie H. *Gyroscope and micromirror design using vertical axis CMOS-MEMS actuation and sensing*. Carnegie Mellon University, 2002:246.
7. Nekrasov Ya.A., Belyaeva T.A., Belyaev Ya.V., Bagaeva S.V. Electrical circuits of capacitive sensors of a RR-type micromechanical gyroscope. *Nauchnoe priboroostroenie = Scientific instrument engineering*. 2008;18(1):91–97. (In Russ.)
8. Polyakov S.A., Volkov B.R., Ivanov M.A. Development of a measuring transducer for a gasoline dielectric control device. *Izmereniya, avtomatizatsiya i modelirovanie v promyshlennosti i v nauchnykh issledovaniyakh IAMP-2013: sb. st. konf. = Measurements, automation and modeling in industry and in scientific research IAMP-2013: collected articles*. Biysk, 2013:95–97. (In Russ.)
9. Minaev I.G., Mastepanenko M.A. Capacitive method for measuring the level of conductive and dielectric liquids. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2011;5:52–55. (In Russ.)
10. Arbuzov V.P., Mishina M.A. System of basis functions for the measurement circuit of a sensor with temporally separated channels. *Measurement Techniques*. 2014;55(9):978–983. doi: 10.1007/s11018-012-0085-x
11. Arbuzov V.P., Mishina M.A., Vodovskova P.N. The use of phase division of the channels of measuring circuits to measure the parameters of multidimensional objects. *Measurement Techniques*. 2014;57(6):621–626. doi:10.1007/s11018-014-0508-y
12. Arbuzov V.P., Mishina M.A., Balashova I.Yu., Larkin S.E., Vodovskova P.N. Defining parameters for multidimensional objects. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. XXXII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Automation and control problems in technical systems: proceedings of the 32<sup>nd</sup> International scientific and engineering conference*. Penza, 2017:277–281. (In Russ.)

13. Kuznetsov E.N. *Strukturno-algoritmicheskie metody povysheniya tochnosti izmereniya parametrov elektricheskikh tsepey: monografiya* = *Structural and algorithmic methods for increasing the accuracy of measuring the parameters of electrical circuits: monograph*. Penza: Inf.-izd. tsentr PGU, 2007:171. (In Russ.)
14. Mitrofanov G., Priyemenko V. Fundamentals and applications of the penetration method. *Tekhnologii seysmorazvedki* = *Seismic technology*. 2011;3:93–108. (In Russ.)
15. Arbuzov V.P., Kalinina M.A. *Piecewise continuous test signals in measuring circuits with time division multiplexing*. Moscow. *Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020. Proceedings*. 2020:9067432 doi:10.1109/MWENT47943.2020.9067432

**Информация об авторах / Information about the authors**

***Виктор Петрович Арбузов***

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры автоматике  
и телемеханики, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная,40)

E-mail: arbuzov\_vp@mail.ru

***Viktor P. Arbuzov***

Doctor of engineering sciences, associate  
professor, professor of the sub-department  
of automatics and telemechanics,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

**Поступила в редакцию / Received 27.12.2020**

**Поступила после рецензирования и доработки / Revised 26.01.2021**

**Принята к публикации / Accepted 28.01.2021**