

# ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

---

УДК 621.317.733

DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-8

*В. П. Арбузов, М. А. Мишина*

## КОРРЕКЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Эксплуатация датчиков в широком температурном диапазоне требует осуществления дополнительной коррекции температурной погрешности. Целью работы является разработка измерительной цепи высокотемпературного емкостного датчика давления, позволяющей исключить температурную погрешность и обеспечить инвариантность выходного сигнала к параметрам кабеля.

*Материалы и методы.* При разработке измерительных цепей использовались основы схемотехнического проектирования измерительных устройств.

*Результаты и выводы.* Рассмотрены способы коррекции температурной погрешности датчика с использованием термозависимой емкости. Разработана микропроцессорная измерительная цепь высокотемпературного емкостного датчика давления и предложен алгоритм вычисления выходного сигнала измерительной цепи.

**Ключевые слова:** емкостный датчик, температурная погрешность, термозависимая емкость, коррекция погрешности.

*V. P. Arbuzov, M. A. Mishina*

## CORRECTION OF CAPACITIVE PRESSURE SENSOR'S TEMPERATURE ERROR

### **Abstract.**

*Background.* Operation of sensors in a wide temperature range requires additional temperature error correction. The aim of this work is to develop a measuring circuit for high-temperature capacitive pressure sensors allowing to eliminate the temperature error and to ensure the invariance of the output signal to cable parameters.

*Materials and methods.* When developing the measuring circuit the authors used fundamentals of measuring device's circuit design.

*Results and conclusions.* The article considers methods of sensors' temperature error correction using the temperature-dependent capacity. The author's have developed a microprocessor-based measuring circuit for high-temperature capacitive pressure sensors and suggested a calculation algorithm for the measuring circuit's output signal.

**Key words:** capacitive sensor, temperature error, temperature-dependent capacity, error correction.

### Введение

Изменение температуры приводит к изменению не только геометрических размеров изделия, но и к изменению свойств или характеристик материалов, из которых выполнен датчик. Это относится ко всем датчикам, в том числе и к емкостным, хотя они имеют самый широкий температурный диапазон среди параметрических датчиков. В то же самое время для обеспечения работоспособности измерительной цепи ее необходимо разместить в условиях, «комфортных» для работы электроники, соединив кабелем с параметрическим преобразователем датчика. Поэтому наряду с коррекцией температурной погрешности возникает необходимость коррекции погрешности, вызванной паразитными емкостями кабеля.

### 1. Особенности функционирования параметрических преобразователей емкостных датчиков

Измеряемая величина, например давление  $P_x$  (рис. 1,а), воздействуя на упругий элемент емкостного датчика, изменяет значение расстояния  $d_x$  между пластинами рабочего конденсатора (чувствительного элемента датчика)  $C_x$ . В то же время изменение температуры датчика также приводит к изменению значения рабочей емкости и, следовательно, к погрешности датчика. В таком случае температура датчика является «влияющей» величиной, а возникающая от ее действия температурная погрешность в зависимости от условий эксплуатации датчика может быть как основной, так и дополнительной.

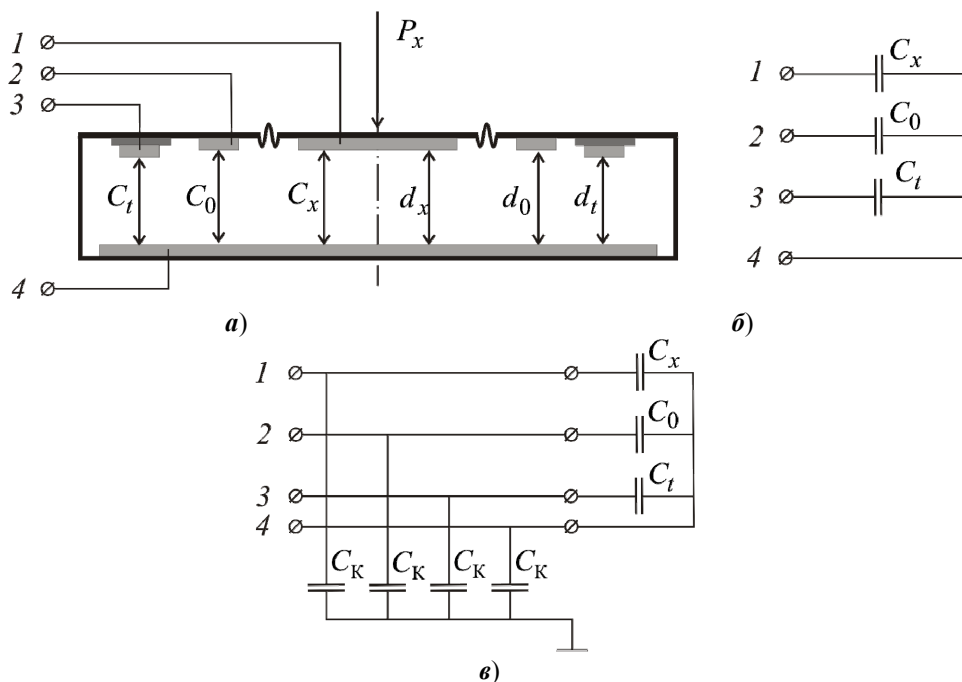


Рис. 1. Конструкция (а) и схемы замещения параметрического преобразователя датчика: без кабеля (б) и с кабелем (в)

Исследование влияния соотношений площади электрода рабочего конденсатора и значения зазора между электродами, толщины «жесткого центра» и модуля упругости упругого элемента (мембраны) на температурную погрешность позволило создать конструкции емкостных датчиков, обладающих максимальной чувствительностью к измеряемому давлению и минимальной к температуре. Специально подобранные материалы для изготовления датчика позволили обеспечить равенство приращения емкости рабочего конденсатора, вызванное изменением геометрических размеров пластин рабочего конденсатора и модуля упругости материала мембраны, при изменении температуры датчика. В результате этого емкостные датчики давления имеют самый широкий температурный диапазон эксплуатации среди параметрических датчиков ( $\pm 200^\circ\text{C}$ ) [1]. При более высокой температуре указанные выше приращения емкостей начинают отличаться друг от друга и температурная погрешность резко возрастает. Для коррекции этой погрешности предложено ввести в конструкцию датчика термозависимую емкость  $C_t$  [2] (рис. 1,а) и, используя ее зависимость от температуры, ввести поправку в выходной сигнал датчика.

Следует отметить, что измеряемая датчиком величина преобразуется в приращение емкости рабочего конденсатора относительно его начального значения. Следовательно измерительная цепь (ИЦ) датчика должна реализовывать дифференциальный метод измерения  $C_x$ , причем для его реализации нужна образцовая емкость  $C_0$ , значение которой равно начальному значению рабочей емкости параметрического преобразователя (ПП) датчика  $C_x$ . С этой целью в ПП датчика располагают дополнительный конденсатор, емкость которого зависит от влияющих факторов так же, как емкость рабочего конденсатора, и не зависит от измеряемой датчиком величины. Кроме того, межэлектродное пространство этих конденсаторов должно быть заполнено одной и той же средой (рис. 1,а). Наиболее оптимальная схема соединения конденсаторов ПП датчика приведена на рис. 1,б [3].

В процессе производства датчиков практически невозможно обеспечить идентичность образцовых емкостей датчиков для всей партии изделий, но соотношение между рабочей и образцовой емкостями при отсутствии измеряемой величины остается постоянным. Поэтому для конкретного экземпляра датчика (с точки зрения измерительного преобразования) эта емкость является образцовой или опорной, а измерительная цепь осуществляет относительное преобразование рабочей емкости в активную величину, пропорциональную отношению либо сопротивлений, либо проводимостей рабочего и опорного конденсаторов ПП датчика ( $C_0 / C_x$  или  $C_x / C_0$ ), а затем реализует дифференциальный метод измерений, используя полученные активные величины. Кроме того, преобразование отношения емкостей ПП датчика осуществляет логометрическую коррекцию погрешности, обеспечивая инвариантность к диэлектрической проницаемости межэлектродного пространства и процедуру коррекции температурной погрешности ПП датчика в диапазоне от минус 200 до плюс 200  $^\circ\text{C}$  [1], а наличие термозависимой емкости  $C_t$  позволяет расширить температурный диапазон работы датчика.

На рис. 1, в приведена схема ПП датчика с учетом схемы замещения кабеля, где  $C_K$  – емкости кабеля, значения которых, как правило, в несколько раз больше значения рабочей и опорной емкостей ПП датчика.

## 2. Способы коррекции температурной погрешности

Первым, наиболее простым вариантом уменьшения температурной погрешности является мультипликативная коррекция рассматриваемой погрешности, которая достигается изменением наклона функции преобразования информативного параметра ПП датчика в зависимости от изменения термозависимой емкости  $C_t$  при изменении температуры датчика [2]. Мультипликативная коррекция осуществляется за счет последовательного включения преобразователя отношения рабочей и опорной емкостей ПП датчика в напряжение и преобразователя термозависимой емкости в напряжение. Измерительная цепь с мультипликативной коррекцией температурной погрешности емкостного датчика приведена на рис. 2, где  $Y_1$  и  $Y_2$  – операционные усилители;  $C_K$  – емкости кабеля. Поскольку температурная погрешность емкостных датчиков давления становится существенной при температуре выше  $+200$  °С, то и изменение значение термозависимой емкости  $C_t$  должно начинаться при этой же температуре [2]. Недостатком приведенной измерительной цепи является наличие двух погрешностей статизма, обусловленных конечным значением коэффициента усиления усилителей ( $K_Y \neq \infty$ ) и емкостью кабеля, шунтирующей входное сопротивление усилителя.

Выходное напряжение ИЦ описывается выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \frac{C_0}{C_x} \left( 1 - \frac{1}{1 + K_Y \beta_1} \right) \cdot \frac{C_t}{C} \left( 1 - \frac{1}{1 + K_Y \beta_2} \right),$$

где  $K_Y$  – коэффициент усиления операционного усилителя;  $\beta_1, \beta_2$  – коэффициенты отрицательной обратной связи операционных усилителей  $Y_1$  и  $Y_2$  соответственно, причем:

$$\beta_1 = \frac{C_x}{C_x + C_0 + C_K} \text{ и } \beta_2 = \frac{C_x}{C_t + C + C_K}.$$

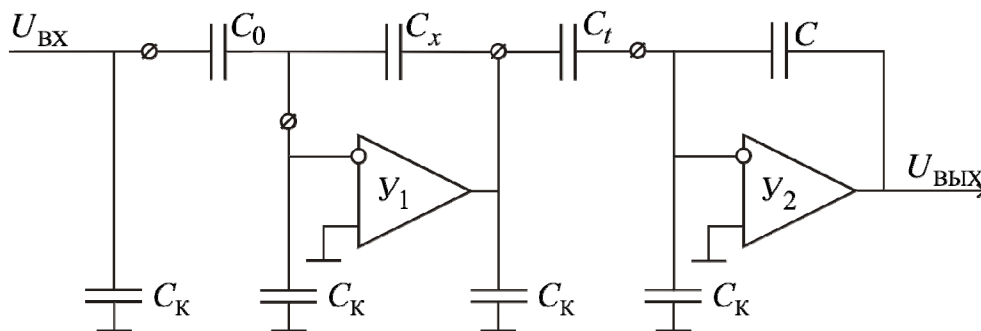


Рис. 2. ИЦ с мультипликативной коррекцией температурной погрешности емкостного датчика

Зависимость значений коэффициентов отрицательной обратной связи  $\beta_1$  и  $\beta_2$  от емкостей  $C_x$ ,  $C_K$  и  $C_t$ , значения которых изменяются как при изменении измеряемой величины, так и при изменении температуры, не позволяет скорректировать погрешности известными методами, а незначительное изменение их значений, например от температуры или вибрации, существенно влияет на изменение их значений, а следовательно, и погрешности преобразования. В результате этого существенного снижения температурной погрешности не достигается.

Другой вариант уменьшения рассматриваемой погрешности емкостного датчика заключается в применении аддитивно-логометрической коррекции, сущность которой состоит в аддитивной коррекции температурного изменения и рабочей и опорной емкостей с последующим делением полученных результатов аддитивной коррекции. На рис. 3,а изображена одна из таких реализаций коррекции температурной погрешности, для обеспечения которой необходимо знать зависимость емкости и рабочего  $C_x$ , и опорного  $C_0$ , и термозависимого  $C_t$  конденсаторов от температуры датчика [3]. Выходной сигнал рассматриваемой измерительной цепи описывается выражением

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{C_0 - C_t \frac{R}{R_{t_1}}}{C_x - C_t \frac{R}{R_{t_2}}},$$

в соответствии с которым с изменением значений резисторов  $R_{t_1}$  и  $R_{t_2}$  осуществляется настройка аддитивной коррекции погрешности.

В приведенной схеме ИЦ входные сопротивления всех усилителей шунтированы емкостями кабеля  $C_K$ , а коэффициенты отрицательной обратной связи всех усилителей являются комплексными величинами и, следовательно, каждая из трех погрешностей статизма становится комплексной величиной, имеющей не только амплитуду, но и фазу. Наличие фазового сдвига, зависящего от изменения значений емкостей  $C_x$ ,  $C_0$ ,  $C_t$  и  $C_K$ , в цепи, содержащей последовательно соединенные дифференциатор, выполненный на усилителе  $U_1$ , и интегратор (усилитель  $U_2$ ) обуславливает необходимость обеспечения устойчивости ИЦ.

На рис.3,б приведен еще один вариант реализации аддитивно-логометрической коррекции температурной погрешности, обеспечивающий ту же функцию преобразования, что и предыдущая измерительная цепь, но обладающий более высокой точностью реализации процедуры коррекции погрешности [3]. Значение погрешности сумматора, выполненного на операционном усилителе  $U_1$ , определяется только параметрами усилителя и резисторами  $R$ ,  $R_{t_1}$  и  $R_{t_2}$ , которые после настройки ИЦ остаются неизменными и, следовательно, погрешность суммирования можно скорректировать. Коэффициент отрицательной обратной связи операционного усилителя  $U_2$ , равный

$$\beta = \frac{C_x}{C_x + C_0 + C_t + C_K},$$

является величиной скалярной, а следовательно, обратная связь не вносит фазовый сдвиг в выходное напряжение измерительной цепи  $U_{\text{ВЫХ}}$ .

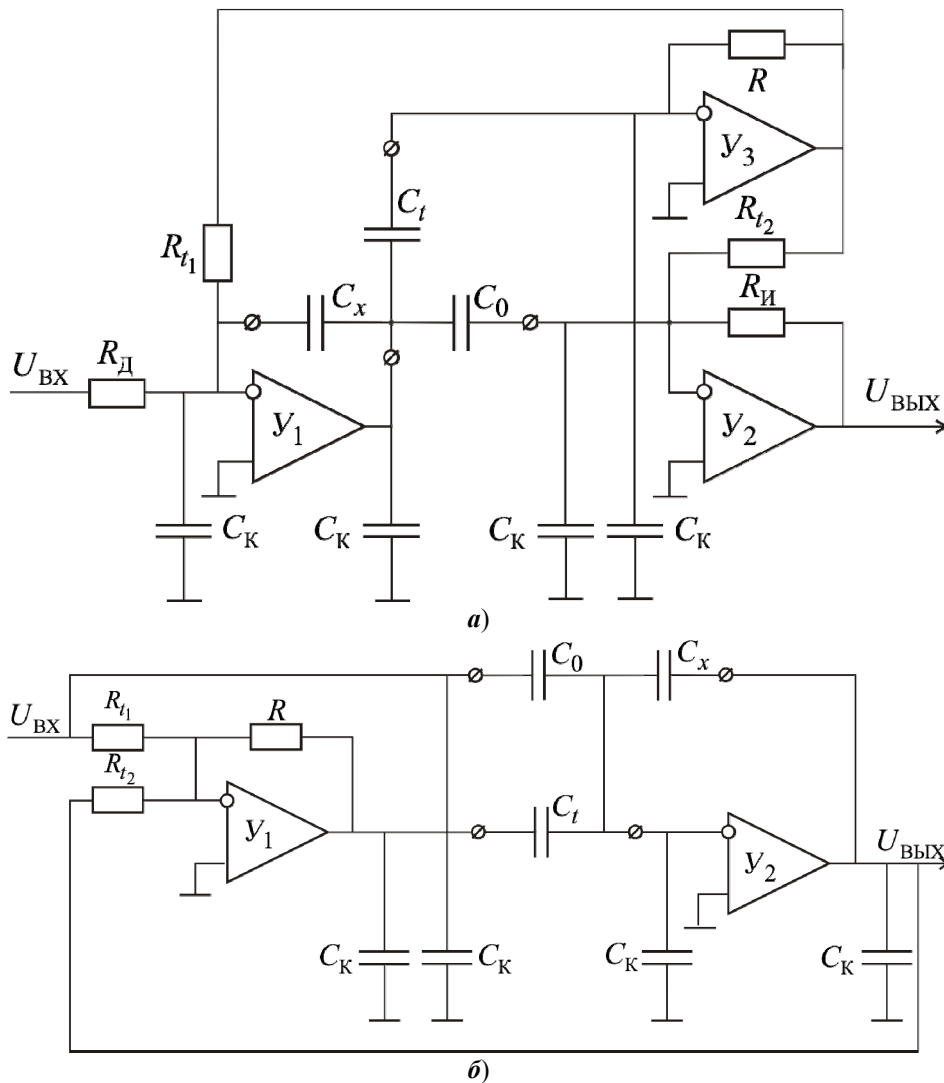


Рис. 3. Измерительные цепи с аддитивно-логометрической коррекцией температурной погрешности

Как в случае с мультипликативной, так и в случае с аддитивно-логометрической коррекцией температурной погрешности, возникающей в параметрическом преобразователе емкостного датчика, необходимо иметь модели рабочей  $C_x$  и опорной  $C_0$  емкостей в виде линейной зависимости от температуры:

$$C_x(t^o) = C_x(1 + \alpha_x \cdot t^o) \text{ и } C_0(t^o) = C_0(1 + \alpha_0 \cdot t^o),$$

где  $\alpha_x$  и  $\alpha_0$  – температурные коэффициенты изменения рабочей  $C_x$  и опорной  $C_0$  емкости, которые до температуры  $+200^\circ\text{C}$  практически совпадают.

Модель термозависимой емкости  $C_t$  для ИЦ с мультипликативной коррекцией должна отражать изменение  $C_t$  при температуре выше  $+200$  °С:

$$C_t(t^o) = C_t \left( 1 + (200 - t^o) \cdot \alpha_t \right),$$

а для реализации аддитивно-логометрической коррекции модель термозависимой емкости  $C_t$  должна иметь вид

$$C_t(t^o) = C_t \left( 1 + \alpha_t \cdot t^o \right),$$

где  $\alpha_t$  – температурный коэффициент изменения термозависимой  $C_t$  емкости.

Поскольку зависимости емкостей датчика  $C_x$ ,  $C_0$  и  $C_t$  от температуры далеки от линейных, то результаты рассмотренной выше коррекции погрешности определяются степенью адекватности моделей  $C_x(t^o)$ ,  $C_0(t^o)$  и  $C_t(t^o)$  объектам (емкостям  $C_x$ ,  $C_0$  и  $C_t$ ).

### **3. Коррекция температурной погрешности и обеспечение инвариантности к параметрам кабельной перемычки**

Другим фактором, влияющим на погрешность высокотемпературных емкостных датчиков, как было показано выше, является шунтирующее входное сопротивление операционного усилителя, сопротивление кабеля, который необходим не только для соединения механической и электронной частей датчика, но и для «развязки» их по температуре. Наиболее эффективным методом коррекции погрешности, вносимой емкостью кабеля, является разделение каналов преобразования емкостей датчика, причем чаще всего используется разделенное во времени преобразование  $(C_0 - C_t \frac{R}{R_{t_1}})$  и

$(C_x - C_t \frac{R}{R_{t_2}})$  с последующим их делением как аналоговым, так и дискретным

способом [3, 4]. В то же время независимое преобразование каждой из емкостей датчика ( $C_0$ ,  $C_x$  и  $C_t$ ) предоставит более широкие возможности для коррекции рассматриваемых составляющих погрешности датчика. На рис. 4 приведена измерительная цепь емкостного датчика, состоящая из микроконтроллера МК, сумматора  $\Sigma$  и операционного усилителя У, которая, во-первых, обеспечивает одновременное и независимое преобразование трех емкостей датчика; во-вторых, исключает влияние емкости кабеля на результат преобразования  $C_0$ ,  $C_x$ ,  $C_t$ ; в-третьих, позволяет вычислить выходной сигнал датчика по полученным значениям его емкостей в соответствии с заранее известной функцией преобразования.

Тест-сигналами для рассматриваемой ИЦ служат синусоидальные напряжения одинаковой частоты, но с разными фазовыми сдвигами, формируемые цифроаналоговыми преобразователями ЦАП1  $U_1(t)$  и ЦАП2  $U_2(t)$  микроконтроллера, а третьим тест-сигналом  $U_3(t)$  является результат суммирования двух предыдущих сигналов:

$$\begin{cases} U_1(t) = U_0 \sin \omega t, \\ U_2(t) = -U_0 \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t + \frac{\varphi}{2} \right), \\ U_3(t) = U_0 \sin(\omega t + \varphi). \end{cases}$$

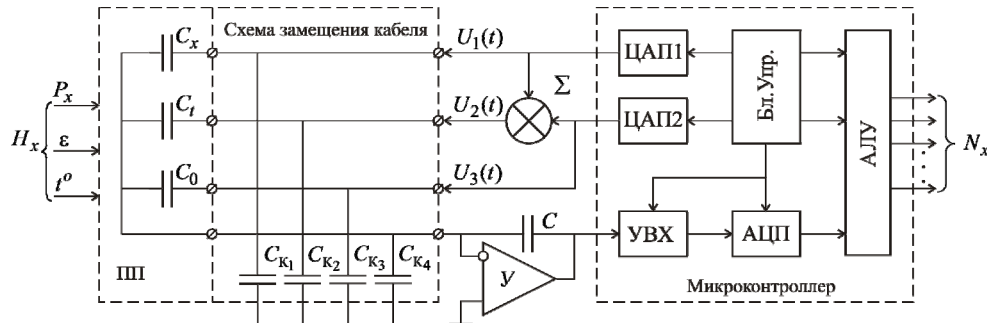


Рис. 4. Микропроцессорная измерительная цепь

В этом случае выходной сигнал усилителя У будет равен:

$$U_y(t) = - \left[ U_1(t) \frac{C_x}{C} - U_2(t) \frac{C_t}{C} + U_3(t) \frac{C_0}{C} \right] (1 + \gamma_M),$$

или

$$U_y(t) = - \frac{U_0}{C} \left( C_x \sin \omega t - C_t \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t + \frac{\varphi}{2} \right) + C_0 \sin(\omega t + \varphi) \right) (1 + \gamma_M), \quad (1)$$

где  $\gamma_M$  – погрешность, обусловленная конечным значением коэффициента усиления операционного усилителя и наличием емкости кабеля.

Для получения выходного сигнала ИЦ, пропорционального информативному параметру, необходимо из выражения (1) найти неизвестные  $C_0$ ,  $C_x$ ,  $C_t$ . С этой целью определим мгновенные значения выходного сигнала  $U_y(t)$  усилителя в моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ :

$$\begin{cases} U_{y_1} = - \frac{U_0}{C} \left( C_x \sin \omega t_1 - C_t \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t_1 + \frac{\varphi}{2} \right) + C_0 \sin(\omega t_1 + \varphi) \right) (1 + \gamma_M), \\ U_{y_2} = - \frac{U_0}{C} \left( C_x \sin \omega t_2 - C_t \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t_2 + \frac{\varphi}{2} \right) + C_0 \sin(\omega t_2 + \varphi) \right) (1 + \gamma_M), \\ U_{y_3} = - \frac{U_0}{C} \left( C_x \sin \omega t_3 - C_t \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t_3 + \frac{\varphi}{2} \right) + C_0 \sin(\omega t_3 + \varphi) \right) (1 + \gamma_M). \end{cases} \quad (2)$$

Поскольку формированием тест-сигналов управляет микроконтроллер, то частота  $\omega$  и фазовый сдвиг  $\varphi$  известны. Синхронизация начала выборки мгновенных значений с одним из тест-сигналов, например  $U_1(t)$ , и последующее срабатывание устройства выборки и хранения (УВХ) и аналого-



цифрового преобразователя (АЦП) через фиксированные промежутки времени, равные  $\Delta t$ , ( $t_1 = 0$ ,  $t_2 = \Delta t$ ,  $t_3 = 2\Delta t$ ), позволяет исключить из-под знака синуса все неизвестные. В результате получим систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} U_{y_1} = a_{11}C_x + a_{12}C_t + a_{13}C_0, \\ U_{y_2} = a_{21}C_x + a_{22}C_t + a_{23}C_0, \\ U_{y_3} = a_{31}C_x + a_{32}C_t + a_{33}C_0, \end{cases} \quad (3)$$

аналитическое решение которой относительно  $C_0$ ,  $C_x$ ,  $C_t$  показало, что множитель  $-U_0(1 + \mu_M) / C$ , входящий в каждый из коэффициентов  $a_{ij}$  системы, сокращается и в конечном выражении для вычисления выходного сигнала отсутствует. Поэтому в системе (3) примем

$$a_{11} = \sin \omega t_1; \quad a_{12} = \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t_1 + \frac{\varphi}{2} \right); \quad a_{13} = \sin(\omega t_1 + \varphi);$$

$$a_{21} = \sin \omega t_2; \quad a_{22} = \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t_2 + \frac{\varphi}{2} \right); \quad a_{23} = \sin(\omega t_2 + \varphi);$$

$$a_{31} = \sin \omega t_3; \quad a_{32} = \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \omega t_3 + \frac{\varphi}{2} \right); \quad a_{33} = \sin(\omega t_3 + \varphi).$$

Решим систему линейных уравнений (3) относительно  $C_0$ ,  $C_x$ ,  $C_t$  методом Крамера:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} C_x \\ C_t \\ C_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_{y_1} \\ U_{y_2} \\ U_{y_3} \end{vmatrix}.$$

В результате решения получим:

$$C_x = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad C_t = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad C_0 = \frac{\Delta_3}{\Delta} \quad \text{при } \Delta \neq 0,$$

где  $\Delta$  – определитель матрицы  $A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$ ;  $\Delta_i$  – определитель матри-

цы, полученной из  $A$  путем замены  $i$ -го столбца столбцом свободных членов.

Затем определим выходной сигнал ИЦ:

$$N_x = \frac{C_x - C_t}{C_0 - C_t} = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\Delta_3 - \Delta_2}.$$

Следовательно, для вычисления выходного сигнала ИЦ необходимо получить и запомнить мгновенные значения  $U_y(t)$  в моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$

и  $t_3$ , рассчитать коэффициенты  $a_{ij}$ , а затем определители  $\Delta_i$ . На рис. 5–7 представлены блок-схемы алгоритма вычисления выходного сигнала ИЦ.

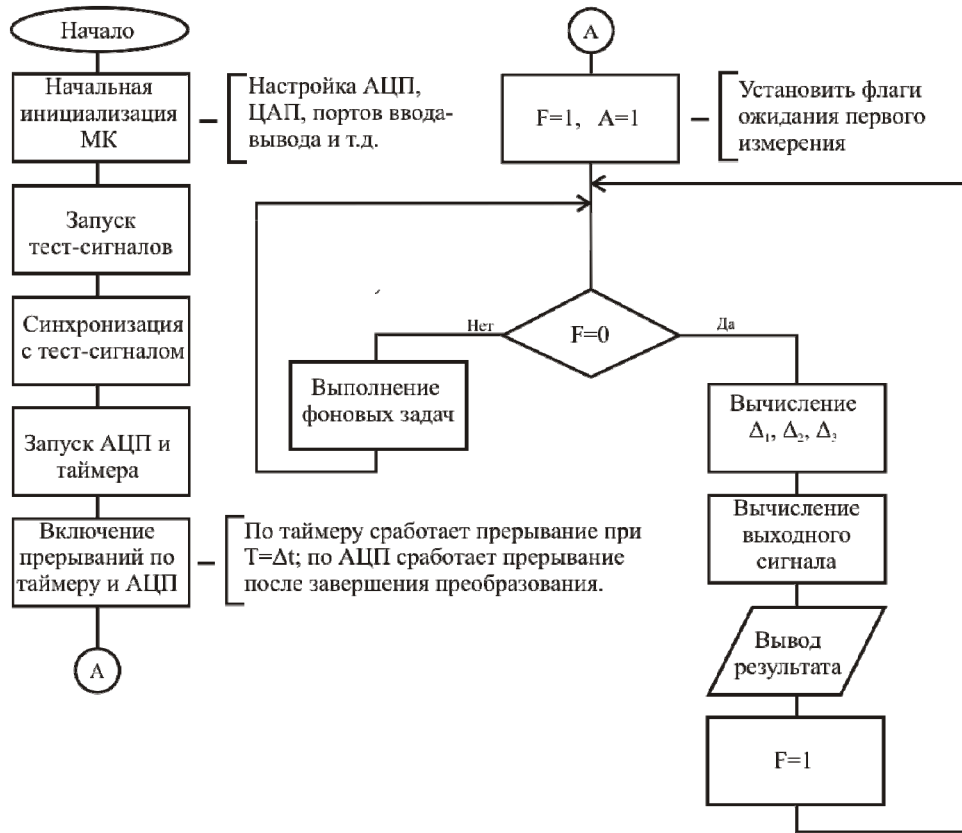


Рис. 5. Блок-схема основного алгоритма

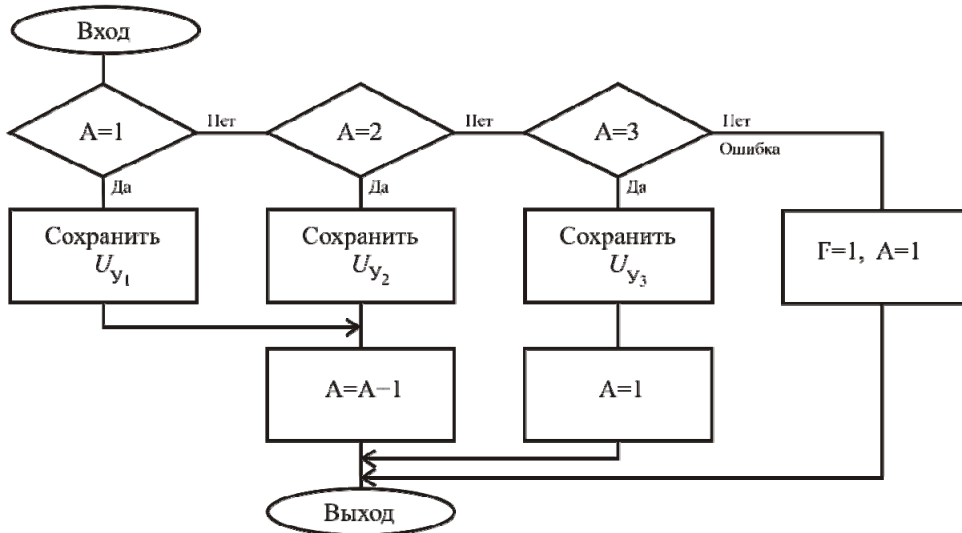


Рис. 6. Блок-схема основного алгоритма обработки прерывания от АЦП

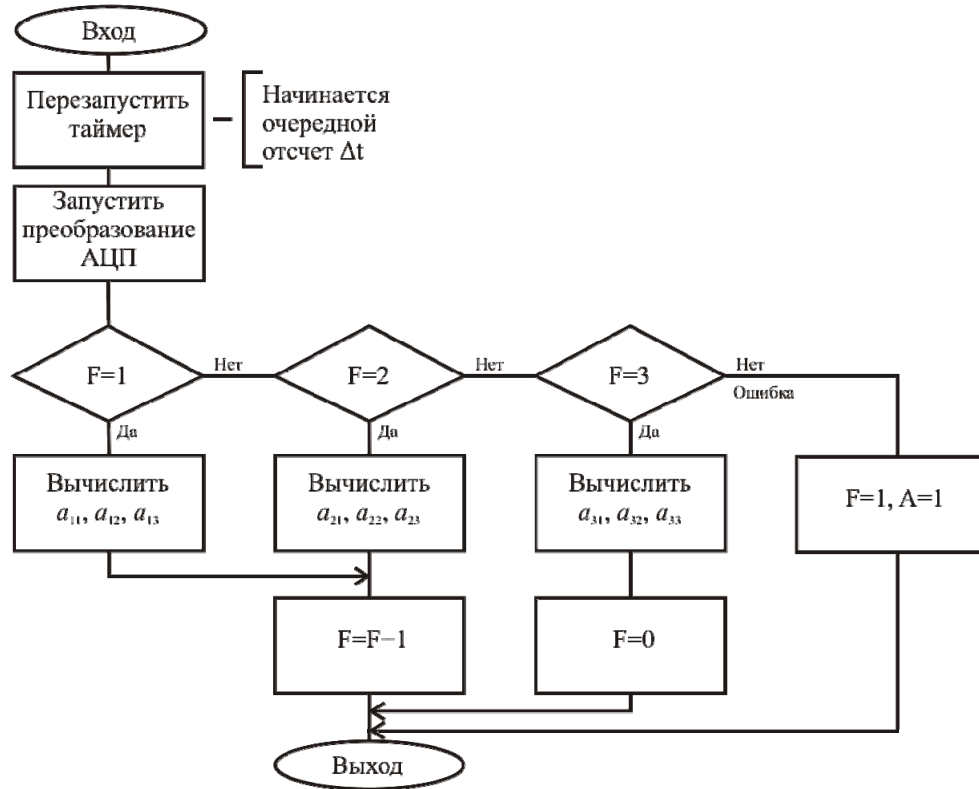


Рис. 7. Блок-схемы основного алгоритма обработки прерывания по таймеру

### Заключение

Предложенная измерительная цепь высокотемпературного датчика давления обеспечивает исключение как температурной погрешности, так и погрешности, вызванной конечным значением коэффициента усиления операционного усилителя и наличием емкости кабельной перемычки. Разработан алгоритм обработки измерительной информации и вычисления выходного сигнала ИЦ.

### Библиографический список

1. **Лебедев, Д. В.** Совершенствование датчиков на базе современных технологий / Д. В. Лебедев // Приборы и системы управления. – 1988. – № 4. – С. 17–19.
2. **Карпов, В. А.** Универсальный измерительный преобразователь для дифференциального емкостного чувствительного элемента / В. А. Карпов, В. А. Хананов // Вестник ГГТУ им. Сухова. – 2014. – № 1. – С. 91–96.
3. **Арбузов, В. П.** Измерительные цепи высокотемпературных емкостных датчиков давления / В. П. Арбузов, М. А. Мишина, П. Н. Бельнцева, И. Ю. Ананьина // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 1 (11). – С. 81–88.
4. **Аверин, И. А.** Особенности формирования микроэлектромеханических элементов первичных преобразователей информации / И. А. Аверин, В. Е. Пауткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 24–32.

### References

1. Lebedev D. V. *Pribory i sistemy upravleniya* [Control devices and systems]. 1988, no. 4, pp. 17–19.
2. Карпов В. А., Кхананов В. А. *Vestnik GGTU im. Sukhogo* [Bulletin of GSTU named after Sukhoy]. 2014, no. 1, pp. 91–96.
3. Arbuzov V. P., Mishina M. A., Belyntseva P. N., Anan'ina I. Yu. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurmeent, Monitoring, Management. Control]. 2015, no. 1 (11), pp. 81–88.
4. Averin I. A., Pautkin V. E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 2 (30), pp. 24–32.

---

#### **Арбузов Виктор Петрович**

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

E-mail: arbuzov\_vp@mail.ru

#### **Arbuzov Viktor Petrovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of automation  
and remote control, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

#### **Мишина Марина Александровна**

кандидат технических наук, инженер,  
кафедра автоматике и телемеханики,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная,40)

E-mail: marina\_mishina81@mail.ru

#### **Mishina Marina Aleksandrovna**

Candidate of engineering sciences,  
engineer, sub-department of automation  
and remote control, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

УДК 621.317.733

**Арбузов, В. П.**

**Коррекция температурной погрешности емкостных датчиков давления / В. П. Арбузов, М. А. Мишина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 94–105. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-8**