

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЕМКОСТИ В НАПРЯЖЕНИЕ

*И.В. Брякин* – канд. техн. наук, доцент,

*А.Е. Чалый* – студент

---

Рассматриваются вопросы выбора и разработки схем построения емкостных датчиков для диэлькометрической влагометрии диссипативных материалов. Предлагается вариант схемотехнического решения, основанный на использовании линейных преобразователей емкости в напряжение с парафазным сигналом возбуждения.

В последнее время заметно расширились области применения емкостных датчиков. Это связано с тем, что развитие современной электроники сделало возможным точное преобразование в электрический сигнал малых емкостей датчиков – порядка единиц или десятков пикофарад. Датчики с такими малыми полезными емкостями имеют малые габаритные размеры, а простота конструкции позволяет при правильном выборе конструкционных материалов получить высокую степень устойчивости датчика влажности (ДВ) к неблагоприятным условиям окружающей среды.

Измерительные преобразователи, основанные на диэлькометрическом методе измерений,

нашли широкое применение во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства, в первую очередь, для измерения и контроля влажности различных материалов, а также в научных исследованиях, связанных с изучением состояния и свойств материалов и веществ [1].

Диэлькометрические влагомеры получили широкое распространение благодаря высокой оперативности, малой трудоемкости измерений, удовлетворительной точности, простоте применения и возможности использования в автоматических системах управления. Данный метод измерения влажности распространяется не только на хорошие диэлектрики, но и на диссипативные системы, т.е. объекты с повышенным поглоще-

нием энергии прикладываемого электрического поля.

Анализ возможных вариантов построения ДВ диссипативных материалов (ДМ) показал, что наиболее эффективными для осуществления технологического контроля в условиях текстильного производства являются амплитудные параметрические датчики с последовательным преобразованием [2].

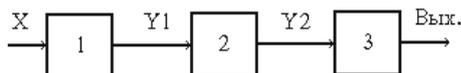


Рис. 1. Структурная блок-схема ДВ: 1 – первичный измерительный преобразователь (ПИП) или чувствительный элемент, измеряющий контролируемый технологический параметр X и вырабатывающий пропорциональный изменению этого параметра сигнал Y1; 2 – усилительно-преобразовательное звено, которое усиливает сигнал с элемента 1 и в случае необходимости осуществляет ряд последовательных преобразований этого сигнала; 3 – выходной преобразователь, согласующий выходной сигнал с датчика с входными параметрами последующего устройства.

Датчик с такой схемой построения отличается наибольшей простотой конструкции и несложной электронной схемой, высокой надежностью и достаточным быстродействием.

В рассматриваемом типе датчиков широкое применение нашли диэлектрические (емкостные) ПИП, которые представляют собой измерительный конденсатор, между обкладками которого пропускается контролируемый образец [3]. Изменение влажности этого продукта приводит к изменению электрической емкости конденсатора. Следует отметить, что при этом особый интерес для задач технологического контроля параметров ДМ представляет емкостный ДВ с мостовой измерительной схемой [4].

Одним из ключевых вопросов эффективно использования такого варианта ДВ является выбор метода его возбуждения. Анализ этого вопроса показал, что наибольшее распространение получили методы возбуждения, основанные на использовании сбалансированного относительно земли синусоидального сигнала переменного тока. В этом случае на два вывода схемы рассматриваемого типа ДВ подаются сигналы, сдвинутые относительно друг друга на 180°. При этом

среднеквадратическое значение сигнала несущей переменного тока, используемого для возбуждения датчика, должно быть меньше, чем максимальный потенциал постоянного тока, который может быть подан на датчик. Амплитуда несущей такого сигнала должна быть стабильной, иначе возникнут помехи, искажающие выходное напряжение.

Вариант структурной блок-схемы мостового ДВ с парафазным сигналом возбуждения в самом общем виде представлен на рис. 2.

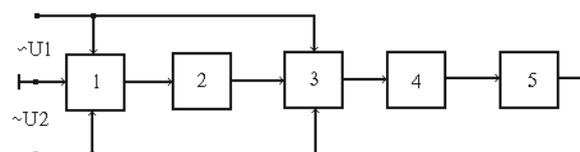


Рис. 2. Структурная блок-схема мостового ДВ с парафазным возбуждением: 1 – емкостный измерительный мост; 2 – полосовой усилитель переменного тока; 3 – синхронный детектор; 4 – фильтр низкой частоты; 5 – усилитель постоянного тока.

Не менее важным для достижения указанной цели является также вопрос выбора схемы реализации метода возбуждения сигналом переменного тока. Из известных типовых схем возбуждения сигналами переменного тока [4] для контроля технологических параметров ДМ наибольшее практическое применение нашли схемы на базе дифференциального трансформатора с тесной индуктивной связью между плечевыми элементами [5, 6]. Структурная блок-схема мостового ДВ со схемой возбуждения на базе дифференциального трансформатора представлена на рис. 3.

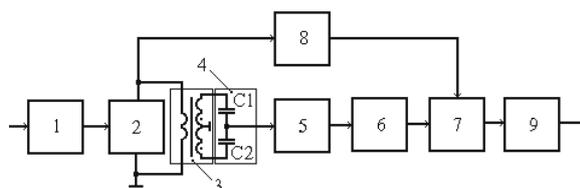


Рис. 3. Структурная блок-схема ДВ на базе дифференциального трансформаторного моста: 1 – генератор синусоидального напряжения; 2 – усилитель мощности; 3 – дифференциальный трансформатор; 4 – емкостный ПИП; 5 – предварительный усилитель; 6 – узкополосный активный фильтр; 7 – синхронный детектор; 8 – фазовращатель; 9 – выходной буферный усилитель.

Дифференциальный трансформатор образует с емкостным ПИП измерительный мост, вспомогательные плечи которого представлены элементами с тесной индуктивной связью, а измерительное плечо и плечо сравнения образованы соответственно воздушными плоскопараллельными и конструктивно идентичными измерительным конденсатором С1 и эталонным конденсатором С2.

Преимущество ДВ с подобной схемой построения в сравнении с другими вариантами ДВ состоит в том, что он обладает значительной временной и температурной стабильностью, инвариантностью к изменениям окружающей среды и исключительно высокой чувствительностью. Исходя из этого, можно считать данный вариант ДВ ДМ наиболее предпочтительным для задач технологического контроля в условиях текстильного производства. Однако следует иметь в виду, что существуют конкретные факторы, которые в определенной мере ограничивают его использование именно в производственных условиях. Прежде всего, это сложность изготовления дифференциального трансформатора с мультифилярной обмоткой и его высокая стоимость. Кроме того, конструктивные особенности такого трансформатора существенно увеличивают размеры и вес ДВ в целом.

Существует определенная практика [1] решения вопроса совершенствования используемых датчиков контроля, которая основана на оптимизации геометрических и электрических параметров; использовании специальных конструктивных материалов и достижениях интегральной технологии, а также различных схемных решениях.

Исходя из этого и с учетом особенностей функционирования рассматриваемого ДВ ДМ на базе трансформаторного измерительного моста, можно предложить более совершенную схемную реализацию используемого в данном случае метода возбуждения, основанную на применении современных достижений интегральной схемотехники и позволяющую решить задачу контроля технологических параметров на качественно новом уровне.

Рассмотрим возможность перехода от схемы возбуждения переменным током с использованием симметричного трансформатора к операционному усилителю с дифференциальным выходом. В качестве такого парафазного усилителя возьмем интегральную микросхему КР1100 СКЗ [7], функционально представляющую собой экономичное устройство выборки и хранения

аналоговых сигналов с малыми динамическими ошибками. Данная микросхема выполнена по планарно-эпитаксиальной технологии на биполярных и полевых транзисторах с изоляцией элементов обратносмещенным р-п переходом и характеризуется малыми током потребления и напряжением смещения.

Опишем некоторые особенности работы этой микросхемы, в функциональный состав которой входит и специализированный парафазный операционный усилитель (ПОУ). Принципиальная электрическая схема такого ПОУ представлена на рис. 4.

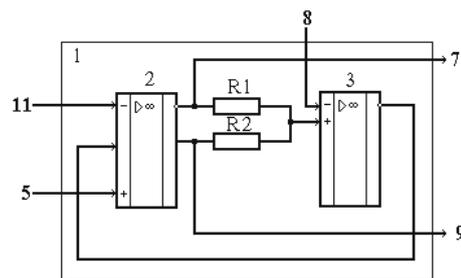


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема ПОУ.

В основе ПОУ 1 лежит дифференциальный балансный усилитель 2 на основе пары полевых транзисторов, имеющих симметричный вход (выводы 5 и 11) и низкоомный симметричный выход (выводы 7 и 9). Функции контроля и коррекции неидентичности формы выходных сигналов основного дифференциального усилителя (ДУ) по переменному току, а также компенсации напряжения смещения нуля относительно опорного напряжения выполняет второй ДУ 3. Сигнал о взаимном искажении по переменному току или общем смещении по постоянному току выходных сигналов ПОУ образуется сложением выходных напряжений первого ДУ 2 на резисторах R1 и R2, усиливается ДУ 3, а затем осуществляет коррекцию по дополнительному входу прохождения основных сигналов в ПОУ 1.

В целях устранения самовозбуждения ПОУ снабжен внутренней частотной коррекцией и охвачен цепями отрицательной обратной связи. Поскольку ПОУ имеет внутреннюю цепь отрицательной обратной связи (резисторы R1 и R2, ДУ 3), то при подаче нулевого потенциала на опорный вывод ДУ 3 (вывод 8) выходные напряжения на выходах ДУ 2 (выводы 7 и 9) автоматически поддерживаются равными по абсолютной величине (модулю) и противоположными в любой момент времени.

Исходя из функциональных особенностей данного ПОУ, определим необходимый вариант его схемы включения. Для этого ПОУ представим как многополюсный операционный усилитель напряжения, управляемый напряжением (МОУ UU). В общем случае подобный МОУ содержит N входов и M выходов. При этом один из выходных узлов, например (N+1)-й узел, является базовым выходным узлом; а (N+M+1)-й узел считается базовым заземленным узлом всего усилителя. Таким образом, МОУ можно рассматривать как неуровновешенный необратимый многополюсник, узлы которого разделены на входные и выходные. Параметры выходных узлов (токи и напряжения) линейно управляются параметрами входных узлов.

Для рассматриваемого типа МОУ UU можем записать общие развернутые уравнения электрической цепи:

$$(\alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2 + \dots + \alpha_N U_N) \mu = U_{N+1} \quad (1)$$

или

$$U_1 = (1/\mu \alpha_1) U_{N+1} - (\alpha_2/\alpha_1) U_2 - \dots - (\alpha_N/\alpha_1) U_N;$$

$$U_{N+k} = \beta_k Y_{N+1} \quad (k=2, 3, \dots, M);$$

$$I_1 = I_2 = \dots = I_N = 0,$$

где  $U_i (i=1, 2, \dots, N)$  – параметры входных узлов (входные напряжения);  $U_{N+k} (k=2, 3, \dots, M)$  – параметры выходных узлов (выходные напряжения);  $\alpha_i$  – некоторый коэффициент, ограниченный по модулю,  $|\alpha_i| < \infty$ ;  $\mu$  – произвольный коэффициент управления (коэффициент усиления);  $\beta_k$  – произвольная ограниченная по модулю константа,  $|\beta_k| < \infty$ .

Согласно развернутому уравнению (1), МОУ является источником напряжения со многими выходами, задающее напряжение (ЭДС) которого  $U_{N+1}$  линейно зависит от взвешенной суммы управляющих (входных) напряжений  $U_1, \dots, U_N$ .

Рассмотрим многополюсную электрическую цепь, которая в совокупности с МОУ является его общей схемой включения и наиболее полно отражает его функциональные возможности (рис. 5).

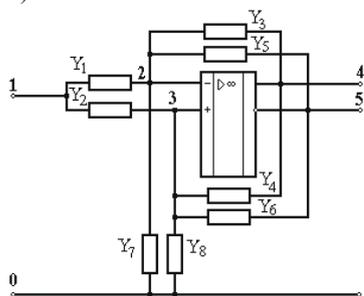


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема МОУ.

Вспользуемся известным методом расчета схемных функций электрических цепей с МОУ [8]. Определим передаточные функции по напряжению  $T_{1,4}$  и  $T_{1,5}$  между узлами 1 и 4, 5 представленной на рис. 5 электрической цепи. Для этого, согласно (1), запишем уравнение рассматриваемой электрической цепи:

$$\mu_1 U_2 + \mu_2 U_3 = U_4; U_5 = -\beta Y_4. \quad (2)$$

Обычным методом сформируем матрицу проводимостей  $Y_0$  для регулярной части электрической цепи:

	1	2	3	4	5
1	$Y_1+Y_2$	$-Y_1$	$-Y_2$	0	0
$Y_0 = 2$	$-Y_1$	$Y_1+Y_3+Y_5+Y_7$	0	$-Y_3$	$-Y_5$
3	$-Y_2$	0	$Y_2+Y_4+Y_6+Y_8$	$-Y_6$	$-Y_4$

Вспользуемся правилами перехода от матрицы проводимостей регулярной части электрической цепи к матрице проводимостей электрической цепи с МОУ [8]. В результате этого получим матрицу проводимостей вида:

	1	3	4
1	$Y_1+Y_2$	$-Y_2 - (\mu_2/\mu_1)Y_1$	$(1/\mu)Y_1$
$Y = 2$	$-Y_1$	$(\mu_2/\mu_1)(Y_1+Y_3+Y_5+Y_7)$	$-Y_3 - (1/\mu_1)(Y_1+Y_3+Y_5+Y_7) + \beta Y_5$
3	$-Y_2$	$Y_2+Y_4+Y_6+Y_8$	$-Y_6 + \beta Y_4$

Из матрицы проводимости для Y находим:

$$T_{1,4} = \frac{\Delta_{1,4}}{\Delta_{1,1}} = \frac{Y_2(\mu_2/\mu_1)(Y_1+Y_3+Y_5+Y_7) - (-\mu_2/\mu_1)Y_1(Y_2+Y_4+Y_6+Y_8)}{-(\mu_2/\mu_1)(Y_1+Y_3+Y_5+Y_7)(Y_6 - \beta Y_4) + Y_2(Y_2+Y_4+Y_6+Y_8) + (1/\mu_1)(Y_1+Y_3+Y_5+Y_7)(Y_6 - \beta Y_4)} \quad (3)$$

$$T_{1,5} = -\beta T_{1,4}. \quad (4)$$

Анализируя полученные соотношения (3), (4) с точки зрения практической реализации выбранного варианта схмотехнического решения и учитывая реальные значения параметров элементов рассматриваемой электрической цепи, выражение (3) трансформируем к виду:

$$T_{1,4} = - (1 + Y_8/Y_4) / [(\mu_2/\mu_1)\beta + (1 + Y_8/Y_4)(1/\mu)].$$

Исходя из особых свойств параметров используемого ПОУ, окончательно можем записать:

$$T_{1,4} = - (1 + Y_8/Y_4); T_{1,5} = -T_{1,4}. \quad (5)$$

Полученный вид передаточной функции (5) соответствует схеме включения ПОУ в качестве инвертирующего усилителя с высокоомным входом (рис. 6).

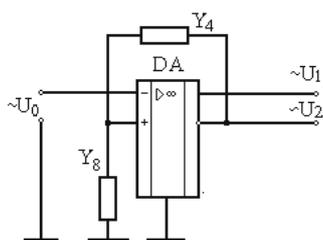


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема ПОУ.

Рассмотренные особенности работы и результаты исследования вариантов включения выбранного типа интегральной микросхемы дают основание для ее использования в качестве парафазного прецизионного источника ЭДС и позволяют перейти от преобразования измеряемой величины в неравновесие четырехплечего измерительного трансформаторного моста (мостовой датчик) к преобразованию в разность двух емкостных сопротивлений (полумостовой датчик).

Таким образом, постановку вопроса о создании измерителя влажности, удовлетворяющего современным требованиям производства, в определенном смысле можно свести к задаче построения линейного ПЕН на базе недорогих и доступных для использования интегральных операционных преобразователей (КР1100 СКЗ), переориентированных на функционирование в составе полумостового датчика.

Вариант блок-схемы такого полумостового ДВ ДМ с парафазным сигналом возбуждения представлен на рис. 7.

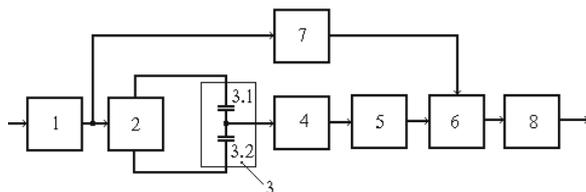


Рис. 7. Структурная блок-схема полумостового ДВ: 1 – маломощный генератор синусоидального напряжения; 2 – парафазный прецизионный источник синусоидального напряжения (ЭДС); 3 – емкостный измерительный преобразователь (ЕИП); 4 – предварительный усилитель; 5 – узкополосный активный фильтр; 6 – синхронный детектор; 7 – фазовращатель; 8 – выходной буферный усилитель.

Блоки 2, 3 и 4 функционально образуют линейный ПЕН, а совокупность измерительного

конденсатора 3.1 и эталонного конденсатора 3.2 в свою очередь образуют ЕИП.

Процесс измерительного преобразования подобным ДВ ДМ осуществляется следующим образом. Синусоидальное напряжение генератора поступает на блок, который формирует питающее ЕИП парафазное синусоидальное напряжение с фиксированной амплитудой и частотой. При свободных зазорах между электродами воздушных конденсаторов 3.1 и 3.2 измерительный полумост находится в состоянии равновесия. Исследуемый ДМ (лента, ровница, пряжа и т.п.) помещается в зазор между электродами измерительного конденсатора 3.1. При перемещении в рабочей зоне ЕИП контролируемого продукта изменения его влажности вызывают изменение емкости измерительного конденсатора 3.1, что в свою очередь приводит к появлению на выходе ЕИП разностного электрического сигнала, соответствующего разности между значениями емкостей рабочего и эталонного конденсаторов. С выхода ЕИП сигнал, предварительно усиленный блоком 4, поступает на узкополосный активный фильтр 5, осуществляющий его полосно-пропускающую фильтрацию на резонансной частоте питающего ЕИП напряжения. Выделенный на фильтре 5 суммарный электрический сигнал определенной частоты, состоящий из полезного сигнала и некогерентного шума, подается на вход синхронного детектора 6. Модуль 6 с коммутационным режимом функционирования на частоте и фазе питающего ЕИП напряжения осуществляет синхронное детектирование входного напряжения. Необходимая фаза опорного напряжения для синхронного детектора 6 выставляется посредством фазовращателя 8. Продетектированный сигнал представляет собой сигнал постоянного тока, функционально связанный с влажностью ДМ, и фактически отражающий ее изменения. Через выходной буферный усилитель постоянного тока 8 осуществляется соответствующее согласование выходного сигнала ДВ ДМ с электрическими цепями последующих измерительных приборов и устройств.

Экспериментальные исследования функциональных возможностей ДВ ДМ с подобной структурой построения полностью подтвердили состоятельность предлагаемого схемотехнического решения и доказали эффективность оригинального применения интегральной микросхемы КР1100 СКЗ именно для работы в составе линейного ПЕН. Данный вариант ДВ ДМ выгодно отличается от своего прототипа с измерительным трансформатором уменьшенными габари-

тами, весом и энергопотреблением; простотой конструкции и технологичностью изготовления. Кроме того, предложенный вариант ДВ ДМ обладает и достаточно высокой точностью измерительных преобразований, что в совокупности с перечисленными выше достоинствами открывает для него хорошие перспективы в плане использования для решения задач технологического контроля. Макетный образец такого ДВ ДМ успешно выдержал проверку на точность и надежность работы в составе измерительных приборов [6] для контроля влажности ДМ в цеховых условиях.

#### ***Литература***

1. *Конюхов Н.Е., Медников Ф.М., Нечаевский М.Л.* Электромеханические датчики механических величин. – М.: Машиностроение, 1987. – 256 с.
2. *Фрайден Дж.* Современные датчики: Справочник. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2005. – 592 с.
3. *Туричин А.М., Новицкий П.В. и др.* Электрические измерения неэлектрических величин. – Л.: Энергия, 1975. – 576 с.
4. *Шенс Г.Я.* Электронная техника в текстильном материаловедении. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 168 с.
5. *Кар Дж.* Проектирование и изготовление электронной аппаратуры / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 387 с.
6. *Грохольский А.Л., Горбов М.М., Струнский М.Г. и др.* Современные средства контроля диаметра электропроводящих нитей емкостным методом // Измерения, контроль, автоматизация. – М.: Ииформприбор, 1978. – №3 (15). – С. 19–24.
7. *Брякин И.В., Першаков А.В., Першаков В.А.* Прибор для измерения неровноты линейной плотности продуктов прядения на технологическом оборудовании // Проблемы автоматки и управления. – Бишкек: Илим, 1998. – С. 160–165.
8. *Новаченко И.В., Телец В.А.* Микросхемы для бытовой радиоаппаратуры: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 272 с.
9. *Кисель В.А.* Аналоговые и цифровые корректоры: Справочник. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.