

УДК [621.397.6.037.733.2 : 681.84.083.84] : 681.846.73-52

А. А. Зимин, В. Г. Панов и А. С. Целуйкин

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЕМКОСТНЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВИДЕОМАГНИТОФОНОВ

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований емкостного датчика угловых перемещений для систем автоматического регулирования видеомагнитофонов. Выработаны требования к конструкции датчика, в основу работы которого положен метод измерения частоты вращения ведущего вала двигателя видеомагнитофона с помощью цифрового преобразователя угла. Разработано устройство для практического применения в системах автоматического регулирования видеомагнитофонов и в других устройствах регистрации видеoinформации.

В современных видеомагнитофонах различного назначения применяются системы автоматического регулирования (САР), управляющие, в частности, частотой вращения двигателя угла магнитных головок, скоростью движения магнитной ленты и т. д. [1].

Известны цифровые устройства [2], в которых выходной сигнал представляет собой последовательность импульсов с частотой, пропорциональной частоте вращения кодирующего диска, жестко закрепленного на валу ведущего двигателя. Применение этих устройств обеспечивает более высокую угловую разрешающую способность, надежность и точность, чем, например, аналоговые датчики, применявшиеся в видеомагнитофонах до недавнего времени.

Растущие требования к качеству видеозаписи и воспроизведения, повышению надежности работы, уменьшению габаритов и снижению стоимости видеомагнитофонов могут быть удовлетворены модернизацией существующих, а также путем разработки новых элементов САР.

Совершенствование используемых в настоящее время в САР фотоэлектрических датчиков, обеспечивающих измерение абсолютного углового положения вала двигателя с разрешением около 10^{-4} относительно полного оборота, приводит к усложнению технологии их изготовления и, как следствие, к их удорожанию. К тому же датчики имеют большие габариты, невысокую надежность и малый срок службы.

Применение датчиков электромагнитного типа (тахогенераторов, сельсинов и др.), в которых легко осуществляется преобразование углового перемещения вала в цифровой сигнал, ограничивается их низкой угловой разрешающей способностью и большими габаритами.

Датчики угловых перемещений емкостного типа [3] обладают высокой надежностью и небольшими габаритами, однако их широкое использование сдерживается невысокими метрологическими характеристиками, для повышения которых требуется применение специальных методов обработки сигналов.

Недостатки емкостных датчиков САР видеоманитофонов привели к необходимости создания прецизионного емкостного преобразова-

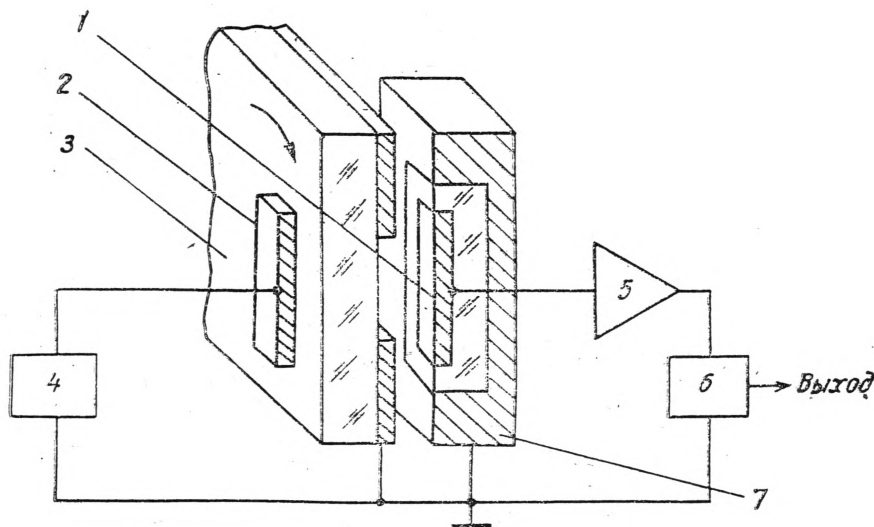


Рис. 1. Схема измерения угловых перемещений посредством емкостного датчика

1 — измерительный электрод, 2 — потенциальный электрод, 3 — экранирующий электрод (кодирующий диск), 4 — генератор, 5 — усилитель, 6 — схема цифровой обработки сигнала, 7 — экран

теля угловых перемещений с повышенными технико-эксплуатационными параметрами.

В данной статье рассмотрен емкостный преобразователь, используемый для измерения скорости вращения ведущего вала двигателя, основным узлом которого является измерительный датчик угловых перемещений (рис. 1). Информация о перемещении преобразуется в датчике в результате изменения частичной емкости между измерительным электродом 1 и потенциальным электродом 2, на который подается напряжение U_r с генератора 4. В зазоре между электрода-

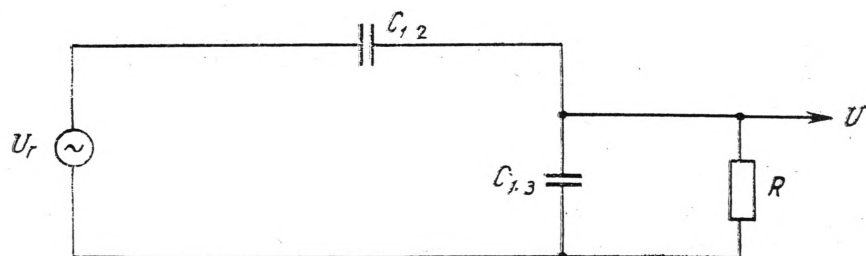


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема емкостного датчика угловых перемещений

ми 1 и 2 находится перемещающийся относительно них экранирующий электрод 3 с окнами в виде сегментов.

Эквивалентная электрическая схема датчика показана на рис. 2 ($C_{1,2}$, $C_{1,3}$ — частичные емкости между соответствующими электродами).

Выходное напряжение U датчика на сопротивлении R измерительного преобразователя определяется из уравнения:

$$\frac{d}{dt} [U(C_{12} + C_{13})] + \frac{U}{R} = \frac{d}{dt} (U_r C_{12}), \quad (1)$$

общее решение которого имеет вид:

$$U = \frac{1}{C_{12} + C_{13}} e^{-\int \frac{dt}{R(C_{12} + C_{13})}} \left[\int \frac{d(U_r C_{12})}{dt} e^{\int \frac{dt}{R(C_{12} + C_{13})}} dt + A \right], \quad (2)$$

где A — постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий.

Конкретное выражение для выходного напряжения U датчика может быть получено путем подстановки в уравнение (1) зависимостей емкостей C_{12} и C_{13} от времени. Поскольку в выражение (2) входит производная напряжения генератора по времени, целесообразно в качестве генератора напряжения использовать генератор с гармоническим выходным напряжением, т. е. $U_r = U_{0r} e^{j\omega t}$.

В этом случае уравнение (1) можно записать в виде:

$$U = U_0(t) e^{j\omega t},$$

где $U_0(t)$ — комплексная амплитуда.

Таким образом, при движении экранирующего электрода выходное напряжение датчика представляет собой амплитудномодулированный сигнал. Подставляя значения U_r и U в формулу (1), получим уравнение:

$$\frac{d}{dt} [U_0(C_{12} + C_{13})] + \left[\frac{1}{R(C_{12} + C_{13})} + j\omega \right] (C_{12} + C_{13}) U_0 = U_{0r} \left(\frac{dC_{12}}{dt} + j\omega C_{12} \right), \quad (3)$$

которое при $\omega \gg \frac{1}{R(C_{12} + C_{13})}$ имеет решение:

$$U = U_{0r} \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{13}}. \quad (4)$$

Аналогичное решение получается в случае неподвижного экранирующего электрода, т. е. при C_{12} и C_{13} , не зависящих от времени. При этом

$$U_0 = U_{0r} \frac{j\omega R C_{12}}{1 + j\omega R(C_{12} + C_{13})}. \quad (5)$$

Следовательно, изменение выходного напряжения как в случае подвижного, так и неподвижного экранирующего электрода будет описываться формулой (4) при условии $R\omega(C_{12} + C_{13}) \gg 1$. В реальном устройстве это условие легко выполняется подбором величин R и ω . Кроме того, емкость C_{13} равна сумме частичной емкости между измерительным и экранирующим электродами и входной емкости усилительного устройства, следовательно $C_{13} \gg C_{12}$. С учетом этого амплитуда выходного напряжения датчика

$$U_0(t) = U_{0r} \frac{C_{12}(t)}{C_{13}}. \quad (6)$$

В выражении (6) можно считать емкость $C_{13} = \text{const}$, поскольку она мало меняется при вращении экранирующего электрода и зависит в основном от входной емкости измерительного преобразователя. Таким образом, в датчике информация об угловом перемещении

преобразуется в амплитудномодулированный сигнал и определяется по амплитуде выходного напряжения, зависящей только от частичной емкости между измерительным и потенциальным электродами.

Для характеристики рассматриваемых емкостных датчиков воспользуемся понятием их разрешающей способности, которую можно оценить через коэффициент модуляции:

$$m = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}}{U_{\text{макс}} + U_{\text{мин}}}, \quad (7)$$

где $U_{\text{макс}}$ — напряжение на выходе датчика, соответствующее такому положению экранирующего электрода, при котором измерительный электрод находится в центре окна,

$U_{\text{мин}}$ — напряжение, соответствующее положению измерительного электрода в середине между окнами.

Поскольку $U_{\text{макс}}$ и $U_{\text{мин}}$ определяются по формуле (6), то выражение (7) можно записать в виде:

$$m = \frac{1 - \frac{C_{12\text{мин}}}{C_{12\text{макс}}}}{1 + \frac{C_{12\text{мин}}}{C_{12\text{макс}}}}. \quad (8)$$

Отсюда, разрешающую способность датчика можно найти через отношение $\eta = C_{12\text{мин}}/C_{12\text{макс}}$ частичных емкостей между потенциальным и измерительным электродами для указанных выше положений

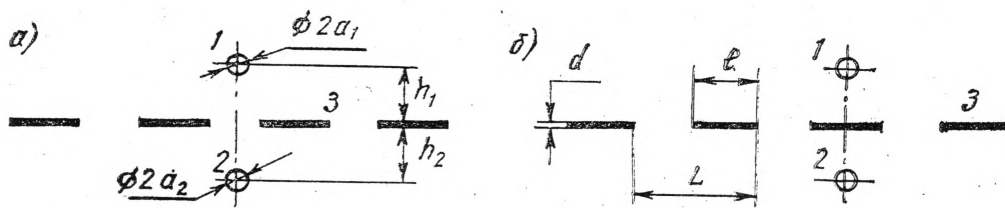


Рис. 3. Расчетная модель для определения параметров емкостного датчика при расположении измерительного (1) и потенциального (2) электродов по центру окна (а) и по центру межоконного промежутка (б) кодирующего диска (3); $2a_1$ и $2a_2$ — диаметры измерительного (1) и потенциального (2) электродов

экранирующего электрода. Для определения η через геометрические параметры системы (рис. 3) воспользуемся формулами для $C_{12\text{мин}}$ и $C_{12\text{макс}}$ [4]. Опуская громоздкие преобразования, запишем значения $C_{12\text{мин}}$ и $C_{12\text{макс}}$ в окончательном виде при условии, что число окон экранирующего электрода достаточно велико и ширина окна в направлении движения намного меньше его длины в радиальном направлении:

$$C_{12\text{мин}} = A \frac{\pi}{2\alpha\beta} \frac{1}{\alpha^2 - \beta^2} (\alpha \text{th} \pi\beta - \beta \text{th} \pi\alpha), \quad (9)$$

$$C_{12\text{макс}} = A \frac{\pi}{2\alpha\beta} \frac{1}{\alpha^2 - \beta^2} (\alpha \text{cth} \pi\beta - \beta \text{cth} \pi\alpha),$$

$$\text{где } A = \frac{4}{h_1 h_2} \left(\frac{L-l}{\pi} \right)^2 e^{-\left(\frac{\pi d}{L-l} + 2 \right)} \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \left[\frac{h_1}{2a_1} + \sqrt{\frac{h_1}{2a_1} - 1} \right] \ln \left[\frac{h_2}{2a_2} + \sqrt{\frac{h_2}{2a_2} - 1} \right]}.$$

(Здесь h_1 — расстояние от экранирующего до измерительного электрода, h_2 — до потенциального; L — расстояние между центрами окон,

l — расстояние между соседними окнами экранирующего электрода;
 d — толщина экранирующего электрода; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость материала диска экранирующего электрода;
 ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость воздуха);

$$\alpha = h_1/L;$$

$$\beta = h_2/L.$$

Взяв отношение полученных значений, определим разрешающую способность приведенной на рис. 3 системы:

$$\eta = \frac{C_{12 \text{ мин}}}{C_{12 \text{ макс}}} = \frac{\alpha \text{th} \pi \beta - \beta \text{th} \pi \alpha}{\alpha \text{cth} \pi \beta - \beta \text{cth} \pi \alpha}. \quad (10)$$

Выражение (10) получено для $\alpha \neq \beta$, а поскольку в реальном устройстве всегда выполняются условия $\beta \gg \alpha$ и $\beta \geq 1$, то

$$\eta = \frac{\alpha - \beta \text{th} \pi \alpha}{\alpha - \beta \text{cth} \pi \alpha}. \quad (11)$$

Результаты расчета η и коэффициента модуляции m приведены на рис. 4. Видно, что коэффициент модуляции практически не зависит от

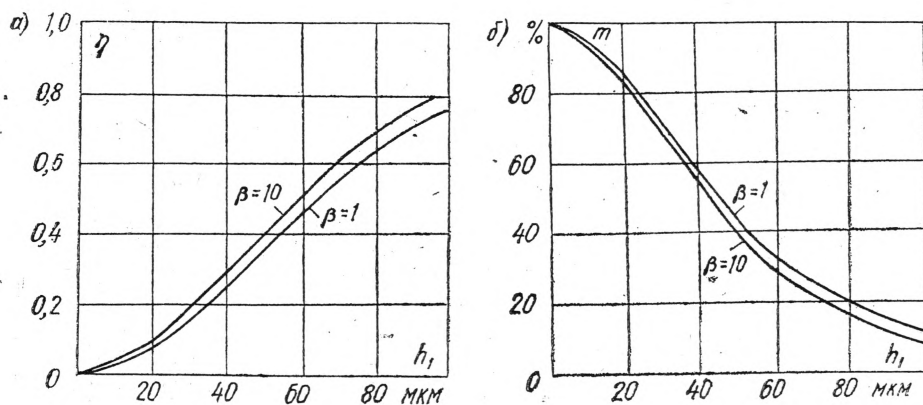


Рис. 4. Зависимости разрешающей способности (а) и коэффициента глубины модуляции (б) от расстояния между измерительным электродом и кодирующим диском

расстояния $h_2 = \beta L$ между потенциальным и экранирующим электродами, а определяется расстоянием $h_1 = \alpha L$. Причем для получения выходного напряжения с коэффициентом модуляции $m > 0,1$ необходимо, чтобы $h_1 \leq L/2$.

Кроме этого условия необходимо реализовать соотношение между Δ — шириной измерительного электрода и l , а именно, $\Delta \ll l$, в этом случае $\eta \rightarrow 0$. В свою очередь, уменьшение ширины измерительного электрода способствует возрастанию крутизны фронтов импульсного выходного напряжения датчика при переходе границы «экран — окно», но в то же время приводит к уменьшению амплитуды выходного напряжения, снимаемого с датчика. На величину выходного напряжения существенное влияние оказывает также толщина металлического покрытия экранирующего электрода, а поскольку емкость C_{12} пропорциональна множителю $e^{-\frac{\pi d}{L-l}}$ (см. выражение (9)), то необходимо, чтобы $d < L - l$, где $L - l$ — ширина окна в направлении перемещения. Если обозначить через γ величину, показывающую, во сколько раз уменьшается емкость C_{12} из-за толщины экранирующего электрода, то d можно определить из соотношения:

$$d = \frac{L-l}{\pi} \ln \gamma. \quad (12)$$

Общие требования к конструкции датчика

1. Ширина измерительного электрода Δ должна быть меньше расстояния l между соседними окнами экранирующего электрода. А так как в реальном устройстве измерительный электрод всегда экранирован от воздействия внешних полей, то зазор между экранами, в котором он размещается, не должен превышать l .

2. Длина измерительного электрода выбирается из условия обеспечения достаточного для работы схемы измерительного преобразователя снимаемого с датчика напряжения $U = U_{0r} \frac{C_{12}}{C_{13}}$, определяемого по формуле (6), где емкость C_{12} может быть вычислена по формуле плоского конденсатора [4]. Так, если экранирующий электрод выполнен в виде диэлектрического диска из изотропного материала с нанесенным на него металлическим покрытием (толщиной 3—5 мкм), в котором за счет удаления металла создается периодически повторяющаяся последовательность прямоугольных окон (кодирующая дорожка), то при расположении измерительного электрода в центре окна

$$C_{12} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\varepsilon_0 (3\delta_2 + \delta_1) + \varepsilon (\delta_1 + \delta_2)} S, \quad (13)$$

где δ_1 — толщина диэлектрического диска,

δ_2 — суммарный воздушный зазор между электродами,

S — проекция площади измерительного электрода на окно кодирующей дорожки.

3. Размер окна экранирующего электрода в радиальном направлении определяется делением площади S в выражении (13) на заданную ширину измерительного электрода, длина которого должна превосходить ширину на величину не менее $2h_1$.

4. Расстояние h_2 должно быть не больше половины периода L кодирующей дорожки экранирующего электрода (см. рис. 4).

5. Выполнение экранирующего электрода в виде металлического диска с прорезями нецелесообразно из-за значительной толщины диска, ослабляющей связь между измерительным и потенциальным электродами согласно (12).

6. Размеры потенциального электрода в направлении перемещения могут быть произвольными, так как при выполнении всех требований, накладываемых на конструкцию измерительного электрода, емкость C_{12} практически равна нулю при расположении измерительного электрода в центре межоконного промежутка. Это свидетельствует о том, что силовые линии поля потенциального электрода, проникающие через соседние с межоконным промежутком окна, замыкаются на экране, окружающем измерительный электрод. Размер потенциального электрода в направлении, перпендикулярном перемещению, должен быть больше размера окна на величину $2h_2$ (расстояние h_2 определяется в основном толщиной диэлектрика, на который наносится токопроводящее покрытие экранирующего электрода).

7. Напряжение на потенциальном электроде должно изменяться с частотой $f > \frac{1}{2\pi RC_{13}}$; кроме того, для выполнения условия неискаженного нарастания сигнала в процессе перемещения экранирующего электрода необходимо обеспечить условие:

$$\frac{1}{2\pi RC_{13}} > \frac{1}{\Delta} \frac{dx}{dt},$$

где $\frac{dx}{dt}$ — мгновенная линейная скорость экранирующего электрода.

Устройство для измерения скорости вращения вала двигателя видеомагнитофона

В устройстве для измерения скорости вращения ведущего вала применен стеклянный диск, металлизированный с одной стороны. На металлизированной поверхности традиционными методами фотолитографии воспроизведена кодирующая дорожка в форме периодически чередующихся сегментов, свободных от металла (рис. 5).

Характеристики емкостного датчика существенно зависят от качества выполнения кодирующей дорожки экранирующего электрода.

Внешний диаметр диска — 85 мм, толщина — 2 мм, толщина металлического покрытия — 5 мкм. Всего на кодирующем диске нанесено 750 сегментов, что позволяет при использовании двух датчиков, сигналы которых сдвинуты по фазе на 90° , а также передних и задних фронтов импульсов, снимаемых с датчиков, получить 3000 счетных импульсов за один оборот кодирующего диска [1]. Технология изготовления этих дисков обеспечивает не только высокую точность выполнения заданной геометрии кодирующей дорожки, но и тиражирование необходимого числа одинаковых дисков с одного фотошаблона.

Измерительные электроды датчика выполнены из фольги, толщина которой выбирается с условием получения минимальной длительности фронтов выходных импульсов, размещенной между двумя плоскими пластинами внешнего экрана и отделенной от них тонким слоем изолирующего диэлектрика.

Потенциальный электрод изготавливается из пластины фольгированного с одной стороны стеклотекстолита, установленной внутри плоского экрана так, чтобы поверхности электрода и внешнего экрана, обращенные к кодирующему диску, лежали в одной плоскости.

В емкостном преобразователе угловых перемещений (рис. 6) с целью повышения разрешающей способности и определения направления перемещения кодирующего диска применены два датчика, выходные сигналы которых сдвинуты по фазе на 90° . Это достигается взаимным расположением измерительных электродов 1 относительно кодирующего металлизированного диска 3 так, что угловое расстояние между ними $\varphi = \frac{2\pi}{N} (K + \frac{1}{4})$, где N — число окон экранирующего электрода 3, а K — целое число. Потенциальные электроды 2 установлены с противоположной стороны экранирующего электрода напротив измерительных электродов. Генератор гармонической частоты 4 вырабатывает напряжение частотой 200 кГц и амплитудой около 60 В, которое подается на потенциальные электроды 2. Амплитудномодулированный сигнал, наводимый на измерительные электроды 1 при вращении кодирующего диска, усиливается предварительными усилителями 5 с высоким входным сопротивлением и поступает в блок обработки

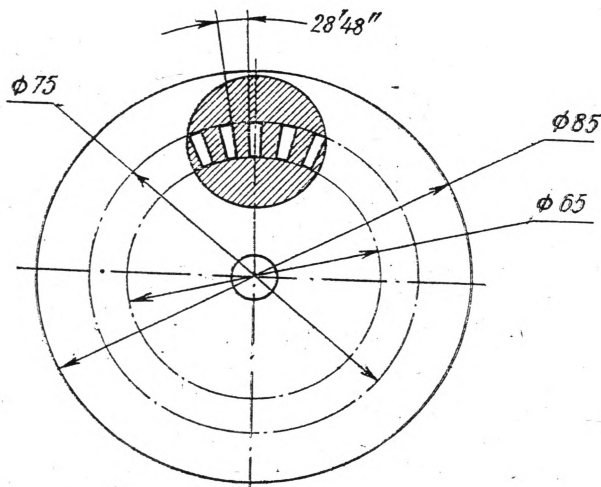


Рис. 5. Общий вид кодирующего диска со стороны токопроводящего покрытия

информации, состоящий из усилителей высокой частоты 6, детекторов 7 и компараторов 8, с выхода которых снимаются прямоугольные импульсы тока, сдвинутые по фазе на 90° , с амплитудой 4,7 В и скважностью $Q = 2$. Установка требуемого сдвига фазы осуществляется в рабочем режиме по осциллограммам на экране двухлучевого осциллографа. Поворотом измерительных электродов вокруг осей и смещением их относительно друг друга устанавливают сдвиг фазы выходных сигналов, равный 90° . На этом регулировка датчика заканчивается.

Результаты испытаний датчика показали, что его работоспособность сохраняется при изменении зазора между измерительным и экра-

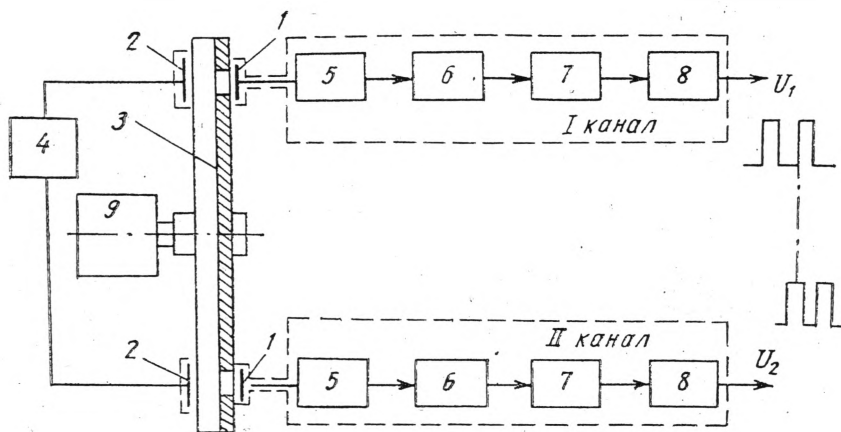


Рис. 6. Структурная схема емкостного преобразователя угловых перемещений

1 — измерительные электроды, 2 — потенциальные электроды, 3 — кодирующий диск, 4 — генератор, 5 — предварительные усилители, 6 — усилители, 7 — детекторы, 8 — компараторы, 9 — двигатель; U_1 и U_2 — выходные сигналы I и II измерительных каналов, смещенные относительно друг друга по фазе на $\pi/2$

нирующим электродами в пределе $1/2$ периода кодирующей дорожки. В пределах таких изменений зазора коэффициент модуляции меняется от 100 до 30%, что обеспечивает точную и надежную индикацию положения кодирующего диска. Причем изменение напряжения генератора 4 в пределах $\pm 10\%$ не сказывается на скважности выходных импульсов измерительного преобразователя. Полученные экспериментальные данные оцениваются лучше теоретических, вычисленных с помощью расчетной модели. Это объясняется наличием экранов измерительных электродов, увеличивающих отношение напряженностей поля за пределами кодирующего диска в зоне измерительного электрода, когда он расположен по центру окна и между окнами кодирующей дорожки. Таким образом, уменьшается отношение η , а следовательно, увеличивается коэффициент модуляции. Разрешающая способность датчика составила $.7'$ (при длительности фронта выходных импульсов около 20 нс в типовом режиме работы двигателя), что согласуется с результатами расчета. Разработанный и изготовленный макет измерительного преобразователя, выполненный на серийных микросхемах широкого применения (серий К521, К237, К504, К198), прост в настройке, надежен в эксплуатации и имеет малые вес и габариты.

Выводы

1. Предложенный цифровой преобразователь, в котором информация об угловом перемещении вала ведущего двигателя преобразуется в цифровой сигнал с помощью емкостного датчика, может быть использован в качестве измерительного датчика САР видеоманитрофонов.

2. Расчетные зависимости выходных характеристик датчика от его геометрических размеров хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Выбранная методика конструирования емкостных датчиков позволяет достичь необходимой чувствительности и разрешающей способности.

3. Созданный образец емкостного преобразователя имеет следующие технические характеристики:

— число счетных импульсов, вырабатываемых датчиком за один оборот вала двигателя — 3000;

— разрешающая способность датчика по углу — $7'$;

— крутизна фронта выходного импульса в типовом режиме работы — 20 нс.

4. Преобразователь без принципиальных доработок может быть использован в качестве счетчика метража ленточного носителя и датчика числа оборотов приводов катушек в САР видеоманитофонов или фотоэлектрических преобразователей изображений непрерывной структуры (ФЭПИНС) рулонного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров А. В. [и др.]. Техника магнитной видеозаписи. Под ред. В. И. Пархоменко. Изд. 2-е. М., «Энергия», 1978, с. 68, 71.
2. Вульвет Дж. Датчики в цифровых системах. М., Энергоиздат, 1981.
3. Грачева А. Н. [и др.]. Емкостный датчик микроперемещений. Авт. свид. СССР № 844986, кл. G 01 B 7/00, 1981.
4. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. Л., Энергоиздат, 1981, с. 228 — 229.

Статья поступила 16 апреля 1984 г.
