

УДК 681.2-5

© М. А. Михайлов, В. В. Манойлов

ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ПРИЛОЖЕНИИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКАНЕРОВ СЗМ

В статье производится анализ существующих современных датчиков перемещения для создания системы автоматического регулирования сканера СЗМ. Также анализируются методы получения информационного сигнала и рассчитываются граничные условия параметров конструкции выбранного датчика.

Кл. сл.: датчики перемещения, сканирующая зондовая микроскопия, СЗМ, емкостные датчики перемещения

ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых важных компонент сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) является сканер, который обеспечивает прецизионные перемещения образца. В методе постоянной высоты, сканер поддерживает постоянный зазор между зондом и поверхностью образца. С точки зрения задачи автоматического регулирования сканер является исполнительным устройством. От характеристик сканера во многом зависит точность измерений [1].

На сегодняшний день сканеры для СЗМ чаще всего изготавливаются из пьезокерамических движителей. Пьезокерамика обладает такими параметрами, как крип и гистерезис. Эти свойства искажают реакцию на входной сигнал и усложняют процесс измерений [2]. Чтобы избежать этих

искажающих свойств есть два варианта решения проблемы:

- 1) улучшать параметры сканера, что резко увеличивает его стоимость;
- 2) создать систему автоматического регулирования перемещения сканера.

Используя второй метод, возможно получить более дешевую конструкцию СЗМ и улучшить параметры измерений. Систему автоматического регулирования можно разбить на следующие компоненты [3].

1. Датчик передвижения сканера.
2. Измерительная схема.
3. Пропорциональный интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор.

Общая схема системы автоматического регулирования представлена на рис. 1.

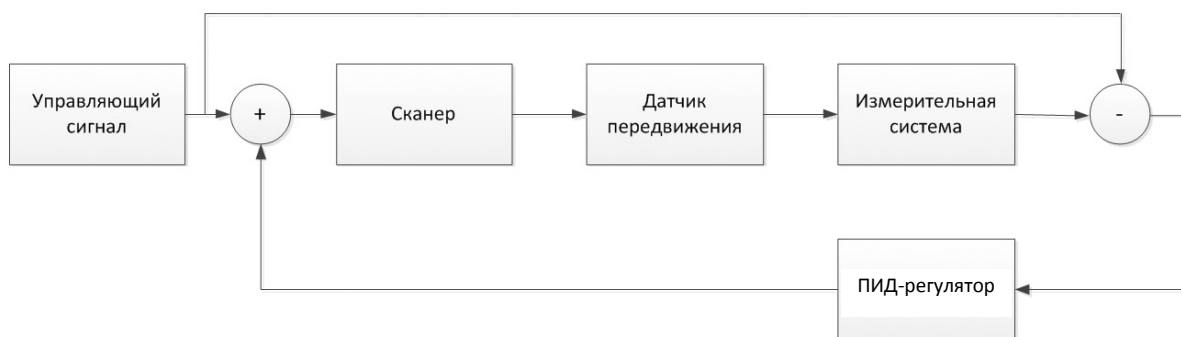


Рис. 1. Схема системы автоматического регулирования

Можно выделить следующие задачи.

1. Выбор принципа действия и конструкции датчика перемещения сканера.
2. Выбор оптимального метода измерения сигнала датчика.
3. Конструирование и реализация цифровой аппаратно-программной системы обработки сигналов (ПИД-регулятор).
4. Изготовление необходимых аппаратных и программных компонент системы и создание экспериментальной установки.
5. Проведение экспериментов.

Эта статья посвящена решению первой задачи — выбору датчика перемещений.

ВЫБОР ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПО ПРИНЦИПУ ДЕЙСТВИЯ

По принципу действия датчики перемещения могут быть [4]:

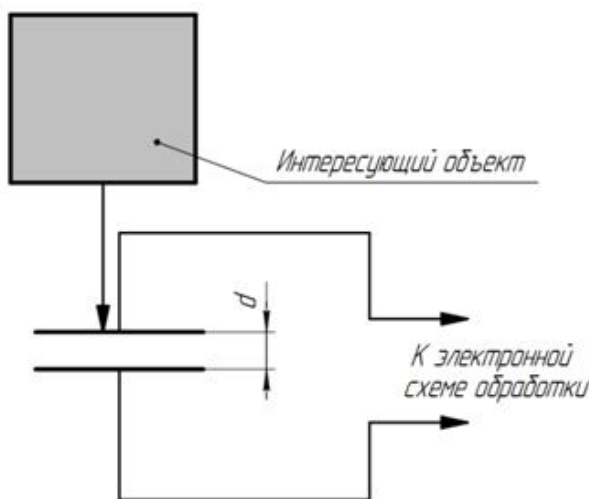


Рис. 2. Емкостной датчик линейного перемещения с изменяющейся величиной зазора [7]

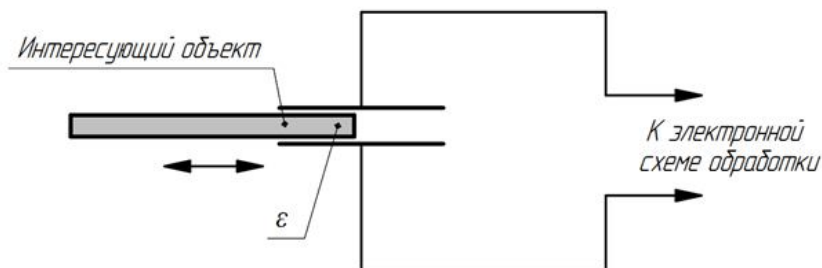


Рис. 3. Емкостной датчик линейного перемещения с подвижным диэлектриком [7]

- 1) емкостными,
- 2) оптическими,
- 3) индуктивными,
- 4) вихретоковыми,
- 5) ультразвуковыми,
- 6) магниторезистивными,
- 7) потенциометрическими,
- 8) магнитострикционными,
- 9) на основе эффекта Холла.

Емкостные датчики перемещения

В основе работы датчиков данного типа лежит взаимосвязь емкости конденсатора с его геометрической конфигурацией. В простейшем случае речь идет об изменении расстояния d между пластинами вследствие внешнего физического воздействия (рис. 2). Поскольку емкость конденсатора изменяется обратно пропорционально величине зазора между пластинами, определение емкости при прочих известных параметрах позволяет судить о расстоянии между пластинами. Изменение емкости можно зафиксировать различными способами (например, измеряя импеданс конденсатора), однако в любом случае конденсатор необходимо включить в электрическую цепь [5].

Чувствительность подобного метода достаточно высока, а также существуют отработанные технологии по созданию конструкций подобной схемы измерений.

Другой схемой, где выходной параметр — электрическая емкость, является схема, содержащая конденсатор с подвижным диэлектриком (рис. 3). Перемещение диэлектрической пластины между обкладками конденсатора также приводит к изменению его емкости. Пластина может быть механически связана с интересующим объектом, и в этом случае изменение емкости свидетельствует о перемещении объекта. Кроме того, если сам объект обладает свойствами диэлектрика и имеет подходящие габариты — он может быть использован непосредственно в качестве диэлектрической среды в конденсаторе [6].

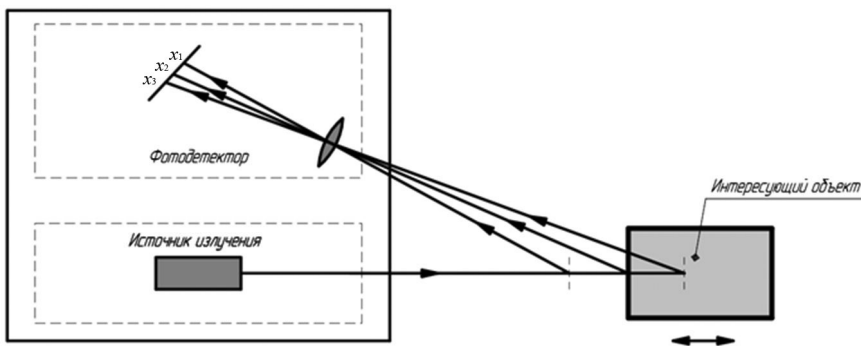


Рис. 4. Оптический датчик перемещения на основе схемы оптической триангуляции [7]

Для применения данного метода в сканерах СЗМ необходимо создать конструкцию с диэлектрическим штоком и стационарным конденсатором. Подобная конструкция намного сложнее, чем конструкция предыдущей схемы измерения. Кроме того, данная схема обладает низкой чувствительностью из-за малого изменения диэлектрической проницаемости при изменении положения штока — формула (1):

$$C(x) = \frac{(\varepsilon(1-x) + x)\varepsilon_0 S}{d}, \quad (1)$$

где $C(x)$ — функция емкости от перемещения x штока, ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика между пластинами, S — площадь обкладок конденсатора, d — зазор между обкладками конденсатора, ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость. Таким образом, данный датчик плохо приспособлен для измерения малых перемещений.

Для применения в задачах СЗМ подходят емкостные датчики линейного перемещения с изменяющейся величиной зазора.

Оптические датчики перемещения

Существует множество вариаций схем датчиков перемещения, основанных на различных оптических эффектах. Пожалуй, наиболее популярной является схема оптической триангуляции: датчик положения является по сути дальномером, который определяет расстояние до интересующего объекта, фиксируя рассеянное поверхностью объекта излучение и определяя угол отражения, что дает возможность определить длину d — расстояние до объекта (рис. 4). Важным достоинством большинства оптических датчиков является возможность производить бесконтактные измерения, кроме того, такие датчики обычно довольно точны и имеют высокое быстродействие. Подобные датчики широко распространены в составе атомно-силовых микроскопов для измерения величины

изгиба кантилевера. Из недостатков данного датчика можно выделить сложность и громоздкость конструкции.

В другой реализации оптического датчика, предназначенной для регистрации и определения параметров малых перемещений и вибраций, используется двойная решетчатая конструкция, а также источник света и фотодетектор (рис. 5). Одна решетка неподвижна, вторая подвижна и может быть механически закреплена на интересующем объекте или каким-либо способом передавать датчику его движение. Малое смещение подвижной решетки приводит к изменению интенсивности света, регистрируемой фотодетектором, причем с уменьшением периода решетки точность датчика возрастает, однако сужается его динамический диапазон.

Дополнительными возможностями применения обладают оптические датчики, учитывающие поляризацию света. В таких датчиках может быть

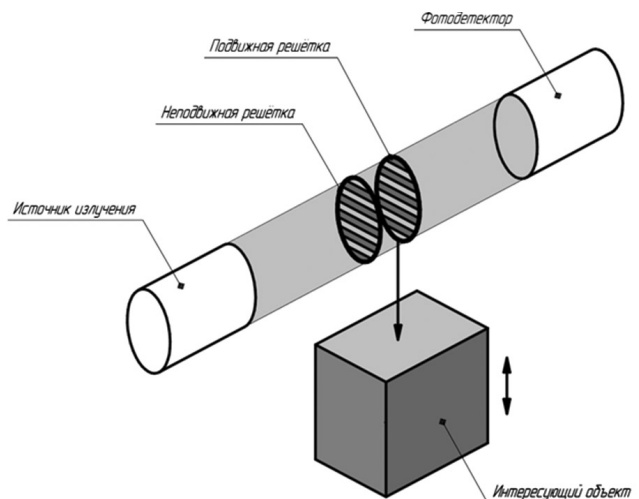


Рис. 5. Оптический датчик перемещения на основе дифракционных решеток [7]

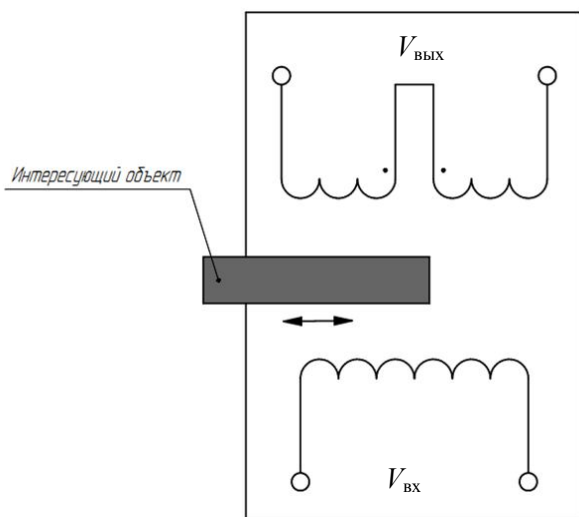


Рис. 6. Индуктивный датчик перемещения на трансформаторе [7]

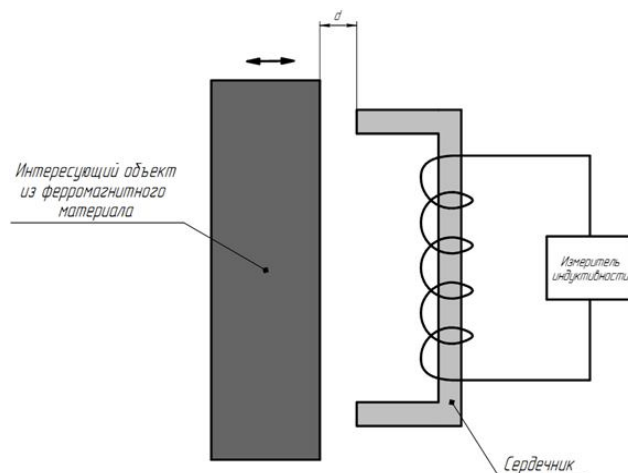


Рис. 7. Индуктивный датчик перемещения для объектов из ферромагнитных материалов [7]

реализован алгоритм селекции объектов по отражательным свойствам поверхности, т. е. датчик может "обращать внимание" только на объекты с хорошей отражающей способностью, прочие объекты игнорируются. Разумеется, чувствительность к поляризации негативно сказывается на стоимости подобных устройств. С помощью данной схемы можно добиться большей точности, но стоимость подобного датчика резко возрастает [7].

Таким образом, для применения в СЗМ подходят оптические датчики на основе схемы оптической триангуляции.

Индуктивные датчики перемещения

В одной из конфигураций датчика данного типа чувствительным элементом является трансформатор с подвижным сердечником. Перемещение внешнего объекта приводит к перемещению сердечника, что вызывает изменение потокоцепления между первичной и вторичной обмотками трансформатора (рис. 6). Поскольку амплитуда сигнала во вторичной обмотке зависит от потокоцепления, по ее величине можно судить о положении сердечника, а значит, и о положении внешнего объекта [8].

Другая конфигурация имеет более простую схему, однако она пригодна лишь для небольшого количества приложений, где требуется определять незначительные перемещения или вибрации объектов, состоящих из ферромагнитного материала. В данной схеме интересующий ферромагнитный объект играет роль магнитопровода, положение которого — зазор d между интересу-

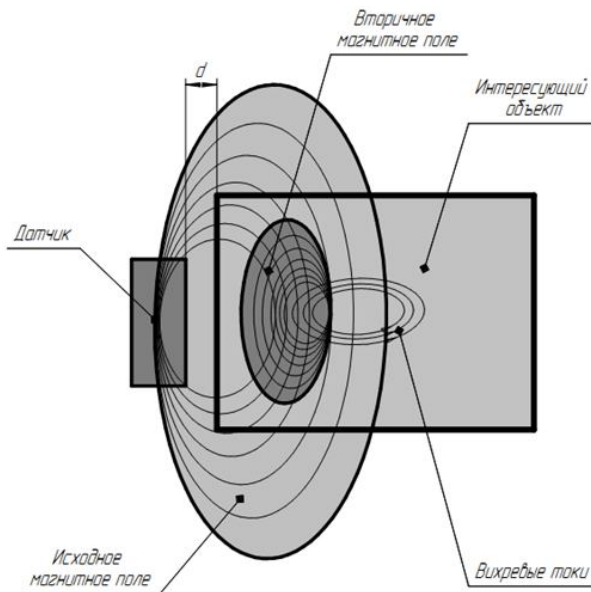


Рис. 8. Вихрековый датчик перемещения [7]

щим объектом и сердечником катушки — влияет на индуктивность измерительной катушки (рис. 7) [9, 10].

Данный метод плохо подходит для применения в СЗМ, т. к. электромагнитные поля могут внести большие погрешности, воздействуя на компоненты СЗМ. Также конструкции подобных датчиков слишком громоздки.

Вихретоковые датчики перемещения

Датчики данного типа содержат генератор магнитного поля и регистратор, с помощью которого определяется величина индукции вторичных магнитных полей. Вблизи интересующего объекта генератор создает магнитное поле, которое, пронизывая материал объекта, порождает в его объеме вихревые токи (токи Фуко), которые в свою очередь создают вторичное магнитное поле (рис. 8). На рисунке d — зазор между датчиком магнитного поля и интересующим объектом. Параметры вторичного поля определяются регистратором, и на их основании вычисляется расстояние до объекта, т. к. чем объект ближе, тем больший магнитный поток будет пронизывать его объем, что усилит вихревые токи и индукцию вторичного магнитного поля. Подобный принцип используется и в вихретоковых дефектоскопах, однако там на параметры вторичного магнитного поля влияет не расстояние до объекта, а наличие в его внутренней структуре скрытых несовершенств. Метод является бесконтактным, однако может применяться только для металлических тел [11].

Данный метод плохо подходит для применения в СЗМ, т. к. электромагнитные поля могут внести большие погрешности, воздействуя на компоненты СЗМ.

Ультразвуковые датчики перемещения

В ультразвуковых датчиках реализован принцип радара — фиксируются отраженные от объекта ультразвуковые волны, расположенного на расстоянии d , поэтому структурная схема представлена источником ультразвуковых волн и регистратором (рис. 9), которые обычно заключены в компактный корпус. Определение временной задержки между моментами отправки и приема ультразвукового импульса позволяет измерять расстояние до объекта с точностью, достигающей до десятых долей миллиметра.

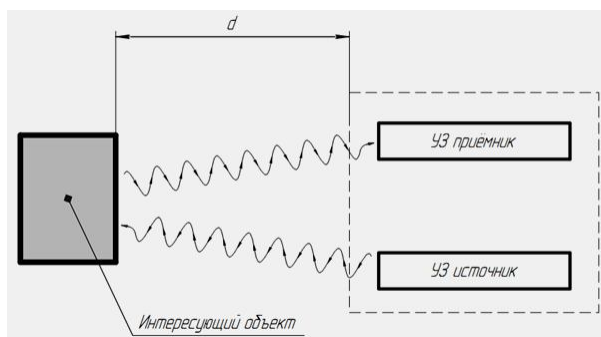


Рис. 9. Ультразвуковой датчик перемещения [7]

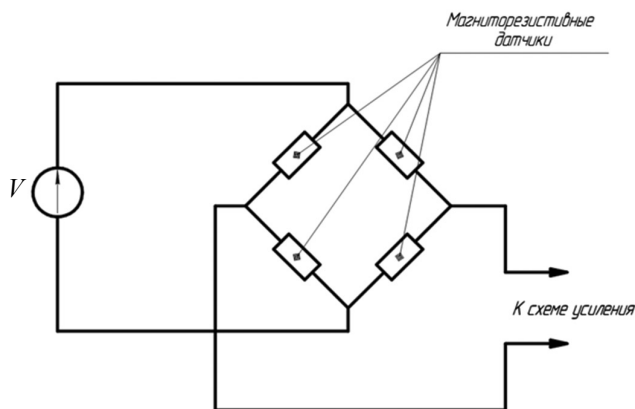


Рис. 10. Магниторезистивный датчик перемещения [7]

Наряду с оптическими ультразвуковые датчики на сегодняшний день являются, пожалуй, наиболее универсальным и технологичным бесконтактным средством измерения. Использование этого принципа измерений опять же можно найти в детекторах обнаружения дефектов, только на этот раз уже в ультразвуковых дефектоскопах [12].

Данный метод плохо подходит для применения в СЗМ, т. к. ультразвуковые колебания могут внести большие погрешности, воздействуя на компоненты СЗМ.

Магниторезистивные датчики перемещения

В магниторезистивных датчиках перемещения используется зависимость электрического сопротивления магниторезистивных пластинок от направления и величины индукции внешнего магнитного поля. Датчик, как правило, состоит из постоянного магнита и электрической схемы, содержащей включенные по мостовой схеме магниторезистивные пластинки и источник постоянного напряжения (рис. 10). Интересующий объект, состоящий из ферромагнитного материала, перемещаясь в магнитном поле, изменяет его конфигурацию, вследствие чего изменяется сопротивление пластинок, и мостовая схема регистрирует рассогласование, по величине которого можно судить о положении объекта [13].

Данный метод плохо подходит для применения в СЗМ, т. к. электромагнитные поля могут внести большие погрешности, воздействуя на компоненты СЗМ.

Датчики на основе эффекта Холла

Датчики этого типа имеют конструкцию, подобную конструкции магниторезистивных датчиков,

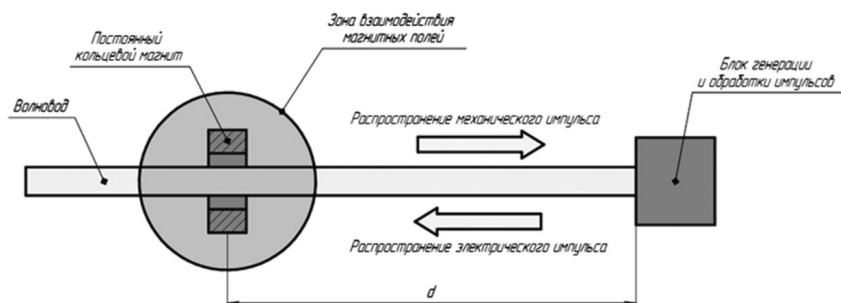


Рис. 11. Магнестрикционный датчик перемещения [7]

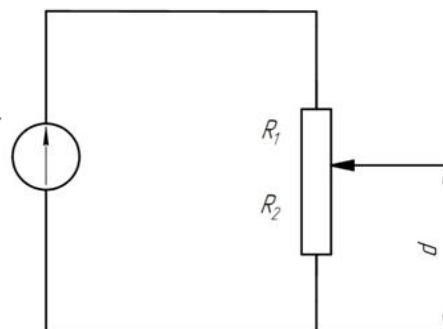


Рис. 12. Потенциометрический датчик перемещения [7]

Однако в основу их работы положен эффект Холла: прохождение тока через проводник, на который воздействует внешнее магнитное поле, приводит к возникновению разности потенциалов в поперечном сечении проводника [14].

Данный метод плохо подходит для применения в СЗМ, т. к. магнитные поля могут внести большие погрешности, воздействуя на компоненты СЗМ.

Магнестрикционные датчики перемещения

Как правило, магнестрикционный датчик представляет собой протяженный канал — волновод, вдоль которого может свободно перемещаться постоянный кольцевой магнит. Внутри волновода содержится проводник, способный при подаче на него электрических импульсов создавать магнитное поле вдоль всей своей длины (рис. 11). На рисунке d — неизвестное перемещение. Полученное магнитное поле складывается с полем постоянного магнита, и результирующее поле создает момент вращения канала, содержащего волновод (эффект Вайдемана). Импульсы вращения распространяются по каналу в обе стороны со скоростью звука материала канала. Регистрация временной задержки между отправкой электрического импульса и приема импульса вращения позволяет определить расстояние до постоянного магнита, т. е. определить его положение. Канал может иметь довольно большую длину (до нескольких метров), а положение магнита может быть определено с точностью до нескольких микрометров. Магнестрикционные датчики обладают отличной повторяемостью, разрешением, устойчивостью к неблагоприятным условиям и низкой чувст-

вительностью к температурным изменениям [7].

Данный метод плохо подходит для применения в СЗМ из-за сложной и громоздкой конструкции.

Потенциометрические датчики перемещения

Датчик данного типа в своей основе имеет электрический контур, содержащий потенциометр (рис. 12). Линейное перемещение d объекта приводит к изменению сопротивлений R_1 и R_2 потенциометра. Если через потенциометр пропускать постоянный ток, то падение напряжения на нем будет пропорционально величине сопротивления и, следовательно, величине линейного перемещения интересующего объекта [13].

Данный метод плохо подходит для применения в СЗМ, т. к. данный метод обладает низкой чувствительностью.

Наряду с механическими датчиками перемещения потенциометрические датчики получили наиболее широкое распространение в силу своей простоты и низкой стоимости, однако для универсальных, прецизионных и бесконтактных измерений в последнее время все чаще используются датчики на основе оптических эффектов.

Вывод

Из всех рассмотренных методик для решения поставленной задачи подходят емкостные датчики и оптические. Так как оба эти датчика подходят по точностным возможностям, то стоит выбрать наиболее дешевый и технологически простой. Таким датчиком является емкостной датчик линейного перемещения с изменяющимся зазором.

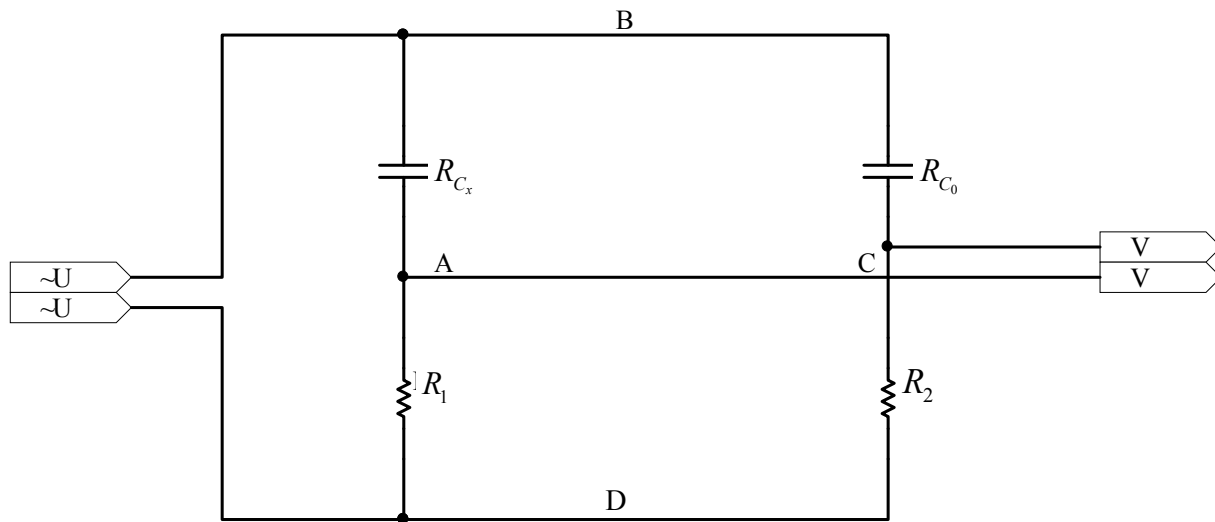


Рис. 13. Мостовая измерительная схема

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ

Можно выделить следующие основные методы измерения емкости.

Метод амперметра и вольтметра

Метод основан на том, что емкость представляет собой сопротивление переменному току:

$$R_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота, f — частота переменного тока. Измеряя падение напряжения на конденсаторе и ток, текущий через него, можно вычислить RC , а затем C . Этот метод реализован в устройствах, называемых авометрами [15].

Мост переменного тока

Конденсатор, включенный в цепь переменного тока i , создает сопротивление R_C . Измерение емкости в данном методе сводится к измерению емкостного сопротивления. Одним из простых способов измерения сопротивления является использование мостовых схем (рис. 13).

Этот метод основан на сравнении сопротивлений, включенных в плечи моста. Сопротивления $R_1, R_2, R_{C_0}, R_{C_x}$ (рис. 13) образуют его плечи. В диагональ моста BD включен генератор переменного напряжения. В диагональ AC — прибор, фиксирующий наличие электрических колебаний, например вольтметр переменного тока, телефон или гальванометр с выпрямителем. Используя первый

и второй законы Кирхгофа, можно получить следующие уравнения для $ADCA$ и $ABCA$:

$$\begin{cases} i_1 R_1 - i_2 R_2 + i_V R_V = 0, \\ -i_x R_{C_x} + i_0 R_{C_0} + i_V R_V = 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} i_1 = i_x + i_V, \\ i_0 = i_2 + i_V, \end{cases}$$

где R_{C_x} и i_x — неизвестное емкостное сопротивление и ток, протекающий через него, а R_V и i_V — сопротивление и ток, протекающие через измерительный прибор.

Можно подобрать такие R_1, R_2, R_{C_0} (рис. 13), чтобы ток через регистрирующий прибор (например, вольтметр) был равен нулю. В этом случае

$$\begin{cases} i_1 = i_x, \\ i_0 = i_2. \end{cases} \quad (4)$$

Решая систему (3), можно получить соотношения:

$$R_{C_x} = \frac{R_1}{R_2} R_{C_0}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{C_x \omega} = \frac{R_1}{R_2} \times \frac{1}{C_0 \omega}, \quad (6)$$

$$C_x = \frac{R_2}{R_1} C_0. \quad (7)$$

В действительности, для того чтобы в диагонали АС ток был равен нулю, необходимо совпадение по фазе потенциалов точек А и С. Этого добиться не всегда удастся. Можно показать, что соотношения (5)–(7) будут выполняться в том случае, когда ток (напряжение) в диагонали будет минимальным. Поэтому измерение C_x сводится к подбору таких R_1, R_2, C_0 , чтобы ток в диагонали был минимальным. Часто сопротивления R_1 и R_2 объединяют в одну калиброванную проволоку (реохорд). Контакт D делается подвижным [16].

Резонансный метод

Резонансный метод измерения емкости основан на определении собственной частоты колебательного контура, в который включен испытуемый конденсатор. Из закона Ома для цепи переменного тока его значение J определяется следующим образом:

$$J = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}, \quad (8)$$

L — известная индуктивность, R — активное сопротивление, U — возбуждающее напряжение. Видно, что ток достигает максимума при $U = \text{const}$, если $L\omega = \frac{1}{C\omega}$. Величина $\omega_0 = (LC)^{-0.5}$ — называется собственной частотой колебаний. Изменяя частоту напряжения и наблюдая за током в цепи, находят ω_0 . Тогда $C_x = \frac{1}{L\omega_0^2}$ [17].

Измерение времени разряда или заряда конденсатора

Метод основан на том, что конденсатор заряжается или разряжается не моментально, а по экспоненциальному закону. Время зарядки или разрядки зависит от емкости конденсатора и сопротивления, через которое протекает ток к конденсатору. При постоянном сопротивлении измеряя время разрядки или зарядки конденсатора, можно получить емкость конденсатора.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ

При создании системы автоматического регулирования следует применять цифровые методы, стремиться к уменьшению сложности схемотехнической части, тем самым повышать гибкость и точность системы в целом.

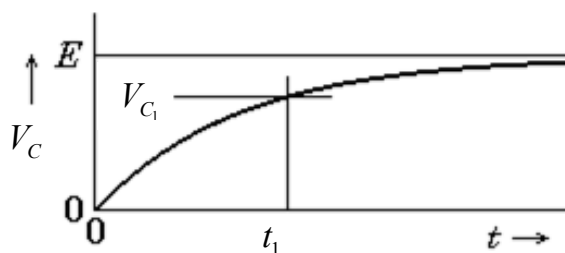


Рис. 14. Изменение напряжения на обкладках конденсатора

Так как в цифровой технике организовать точное измерение времени легче и дешевле, чем точное измерение амплитуды, то был выбран именно этот метод. Измеряться будет время заряда или разряда неизвестной емкости конденсатора.

Закон изменения напряжения на конденсаторе во времени отображен в формуле (9) и проиллюстрирован на рис. 14:

$$t_1 = -RC \times \ln\left(1 - \frac{V_C}{E}\right), \quad (9)$$

где t_1 — момент времени проведения измерения, отсчитывая от момента приложения заряжающего напряжения, с; V_{C_1} — напряжение (В) на обкладках конденсатора в момент времени t_1 ; E — заряжающее напряжение, В.

Принципиальная схема аналоговой части приведена на (рис. 15). Конденсатор заряжается через резистор R_1 . С помощью транзистора Q_1 происходит разряд конденсатора. Для генерирования сигнала окончания зарядки / разрядки можно использовать либо два компаратора, либо АЦП. Так как в обоих случаях необходим ввод гистерезиса для исключения ложных срабатываний, то нетрудно заметить, что при более крутой форме графика изменения напряжения во времени, точность измерения времени реального заряда / разряда повышается.

Так как напряжение изменяется во времени по экспоненциальному закону, то для увеличения скорости измерений нет необходимости разряжать и заряжать конденсатор до предельных значений. Также у цифровых микросхем утечка тока повышается при приближении напряжения к нулю. Таким образом, следует выбрать два порога:

0.17 Vref и 0.5 Vref [18].

Оценим погрешность измерения емкости в зависимости от погрешности измерения времени t (рис. 14 и 15):

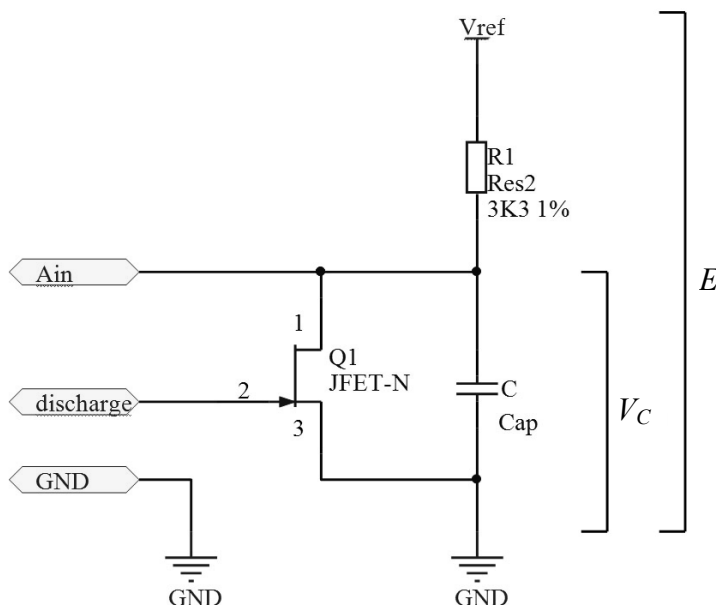


Рис. 15. Аналоговая часть измерения емкости через измерения времени заряда / разряда конденсатора [18]

$$\Delta C = t \frac{1}{-R \ln \left(1 - \frac{V_C}{E} \right)} \approx 273t \cdot 10^{-6}, \Phi. \quad (10)$$

Скорость АЦП в составе микроконтроллеров общего назначения составляет примерно 2.4 МГц. Таким образом, можно обеспечить следующую погрешность измерения емкости:

$$\Delta C \approx 273 \frac{1}{2.4 \times 10^6} \times 10^6 = 0.1 \text{ пФ}. \quad (11)$$

Количество эффективных бит АЦП, встроенных в составе микроконтроллеров общего назначения, равно примерно 12. Опорное напряжение чаще всего составляет 3.3 В. Таким образом, решающая возможность такого АЦП составляет

0.8 мВ. Погрешность измерения времени, вносимая дискретностью АЦП (или гистерезисом компаратора), равна

$$\Delta t = -RC \ln \left(1 - \frac{\Delta V}{E} \right). \quad (12)$$

Тогда погрешность емкости:

$$\Delta C = 21 \text{ пФ}. \quad (13)$$

Если емкость неизвестного конденсатора будет порядка сотни нанофард, то

$$t_1 \approx 366 \times 10^{-6} \text{ с}. \quad (14)$$

Рассмотрим погрешность, вносимую температурным дрейфом резистора R_1 [19] (таблица).

Погрешность, вносимая температурным дрейфом резистора R_1

Погрешность резистора, %	ΔR , Ом	Δt , мкс	ΔC , пФ
± 5	165	18.3	5000
± 1	33	3.7	1000
± 0.1	3.3	0.4	100
± 0.05	1.65	0.2	50
± 0.01	0.33	0.04	10

Если будет использоваться плоскопараллельный конденсатор, то его емкость будет изменяться в соответствии с формулой

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (15)$$

или, подставляя значения:

$$\frac{8.85 \times 10^{-12} \times 1}{d} S = 100 \times 10^{-9}. \quad (16)$$

Откуда

$$\frac{S}{d} = 11.3 \times 10^3. \quad (17)$$

Если $\Delta d_{\text{сканера}} = 1 \times 10^{-10}$ м (технические данные сканера, используемого в составе СЗМ Nano Educator) и в зазоре между обкладками конденсатора воздух, тогда

$$\Delta C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\Delta d} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 1}{1 \times 10^{-10}} S = 4 / 425 \times 10^{-2} S, \quad (18)$$

$$4.425 \times 10^{-2} \times S > 21 \times 10^{-12}, \quad (19)$$

$$S_{\min} > 4 / 9 \times 10^{-10} \text{ м}^2. \quad (20)$$

Диапазон сканера составляет 10 мкм. Следовательно, весь диапазон изменений емкости будет равен

$$C = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 1}{10 \times 10^{-6}} 4.9 \times 10^{-9} = 4.4 \times 10^{-16} \text{ Ф}. \quad (21)$$

Данное значение меньше величины погрешности, следовательно на площадь конденсатора накладывается дополнительное условие и минимальная площадь конденсатора должна удовлетворять формуле (23):

$$C = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 1}{10 \times 10^{-6}} S > 21 \times 10^{-12} \text{ Ф}, \quad (22)$$

$$S_{\min} > 23 / 7 \times 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (23)$$

Тогда

$$d_{\min} = \frac{23.7 \times 10^{-6}}{11.3 \times 10^3} = 2 \times 10^{-9} \text{ м}, \quad (24)$$

что является приемлемым для большинства СЗМ.

ВЫВОДЫ

Нами были проанализированы современные датчики перемещений. Результатом анализа явился выбор емкостного датчика перемещений с из-

меняющимся зазором между обкладками. Также были проанализированы методы измерения информационного сигнала. На основании выбранного метода, были оценены возможные погрешности и созданы ограничения на геометрические параметры емкостного датчика для обеспечения точности в поставленной задаче.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков В.А., Лазарев М.И., Саунин С.А. Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности // Электроника: наука, технология, бизнес. 1997. № 5. С. 7–14.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004. 114 с.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. Издание третье, исправленное. М.: Наука, 1975. 752 с.
4. Аш Ж. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. Книга 1. М.: Мир, 1992. 480 с.
5. Датчики. Справочник / Под ред. Готры З.Ю., Чайковского О.И. Львов: Каменяр, 1995. 313 с.
6. Ацюковский В.А. Емкостные дифференциальные датчики перемещения. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. 106 с.
7. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007. 308 с.
8. Кацман М.М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Форум-Инфра-М, 2002. 264 с.
9. Куликовский Л.Ф., Зарипов М.Ф. Индуктивные преобразователи перемещений с распределенными параметрами. М.: Энергия, 1966. 112 с.
10. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин, 4-е изд. М.-Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1966. 294 с.
11. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение. М.: Мир, 1989. 192 с.
12. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Акустические методы контроля. Книга 2 / Под ред. проф. Сухорукова В.В. М.: Высшая школа, 1991. 283 с.
13. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях. М.: Горячая линия—Телеком, 2007. 95 с.
14. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы. Пер. с польск. Тихонова В.И. и Макидонский К.Б. / Под ред. Хомерики О.К. М.: Энергия, 1971. 352 с.
15. Матлин С.Л. Как измерить емкость конденсатора. М.: Госэнергоиздат, 1952. 28 с.
16. Новодворец Л.А. Испытания силовых конденсаторных установок. М.: Энергия, 1971. 64 с.
17. Топильский В.Б. Схемотехника измерительных устройств. М.: Бином, 2006. 232 с.
18. Цифровой измеритель емкости. Опубликовано 10.12.2008. URL: (<http://radiodet.ru/>).
19. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 248 с.

*Санкт-Петербургский национальный исследова-
тельский университет информационных техноло-
гий, механики и оптики (Михайлов М.А.)*

*Институт аналитического приборостроения РАН,
г. Санкт-Петербург (Манойлов В.В.)*

Контакты: Манойлов Владимир Владимирович,
manoilov_vv@mail.ru

Материал поступил в редакцию 7.12.2012

THE OVERVIEW OF MEASURE METHODS OF SLIGHT DISPLACEMENTS IN THE APPLICATION OF THE AUTOMATIC REGULATION SYSTEM OF SCANNERS OF SCANNING PROBE MICROSCOPES

M. A. Mikhailov¹, V. V. Manoilov²

¹*National Research University Information Technology, Mechanics and Optics, Saint-Petersburg*

²*Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg*

The article analyzes the present modern movement sensors for the development of the automatic control of the scanner of scanning probe microscopes system. Moreover, the receiving information signal methods are analyzed; the boundary conditions of the designed parameters of the selected and matched sensor are estimated as well.

Keywords: movement sensor, scanning probe microscopes, capacitor movement sensor