

Автомобильные датчики положения.

Современные технологии и новые перспективы.

Часть 11. Емкостные датчики —
новые устройства на автомобильном рынке

Светлана СЫСОВЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

Емкостные преобразователи — вид датчиков переменного импеданса с уникальными свойствами, которые, с одной стороны, ограничивали до недавнего времени их широкое распространение, с другой стороны, сегодня формируют новые предпосылки для их массового использования в автоэлектронике.

Введение

В последние годы все больший интерес разработчиков автоэлектроники вызывают емкостные датчики, которые, как и большинство устройств, рассматриваемых в рамках данного цикла статей, предлагают бесконтактность, простоту и компактность конструкций, малый размер и вес, способность функционировать в широких рабочих пределах (включая детектируемый диапазон рабочего хода объекта, рабочий частотный и температурный диапазон и т. д.), низкую цену. От многих других преобразователей датчики, созданные на основе емкостной технологии, выгодно отличается высокая чувствительность к перемещениям (способность детектировать перемещения до 10^{-14} м), высокое разрешение на уровне первичных преобразователей (до $5 \cdot 10^{-18}$ Ф), малое время срабатывания, отсутствие гистерезиса, малая инерционность измерений, температурная стабильность, практически полное отсутствие сигнальных шумов, малое энергопотребление и отсутствие потерь мощности вследствие самонагрева.

Емкостные датчики используются для детектирования движения, перемещения, ускорения, наклона, расхода, влажности и многих других параметров [118, 136–164]. Недорогие емкостные преобразователи могут быть эффективно использованы для измерения положения в классических угловых (угол $\leq 360^\circ$) и линейных системах автоэлектроники. Емкостная технология использует простые схемы обработки сигнала, при этом регулировка смещения и усиления для большинства типов датчиков не требуется, и диапазон выходного сигнала емкостных

электродов может находиться в диапазоне напряжения питания.

Емкостные датчики просты в конструировании — емкостные элементы легко интегрируются на печатную плату или в ИС (как, например, показано в параллельном цикле статей «Автомобильные акселерометры»), но многие типы датчиков очень чувствительны к вариациям зазора — аксиального расстояния между обкладками.

С другой стороны, применение емкостных датчиков в автомобильной промышленности ограничивают следующие аспекты:

- подверженность интерферирующим электромагнитным помехам (но к магнитным полям датчики нечувствительны),
- чувствительность к присутствию проводящих сред, изменяющих диэлектрическую проницаемость,
- некоторая чувствительность к влажности (диэлектрическая проницаемость сухого воздуха несколько выше диэлектрической проницаемости влажного воздуха), типичным для автоэлектроники загрязнениям — жидкостям и пыли (хотя датчики оптически прозрачны),
- низкие уровни первичного сигнала,
- необходимость в адекватной схеме питания с возбуждающими напряжениями порядка 5 В;
- необходимость схемы обработки сигнала с высоким входным импедансом и выходным сигналом в виде пропорционального аналогового напряжения, импульсов тока (ШИМ) или частоты.

Многие, но не все типы емкостных датчиков обеспечивают линейный на первичном уровне выход, пропорциональный положению,

при этом для задач детектирования положения не существует готовых интегральных схем — универсальных ASIC, включающих сенсорный элемент.

Поэтому для преодоления указанных недостатков емкостных датчиков в автоэлектронике может применяться только специализированный механический дизайн и схемотехника, наиболее распространенные методы которой основаны на снятии сигнала переменного импеданса (переменной емкости) при высокочастотном возбуждении чувствительного емкостного элемента, подвижные части которого соединены с детектируемым объектом.

Отсутствие знаний об эффективных способах реализации емкостных преобразователей и объясняет в совокупности некоторое отрицание емкостной технологии, существующее среди инженеров. Поэтому одна из целей данной статьи — устранить определенное недоверие к этой технологии.

Пространственные конфигурации и базовые принципы емкостных датчиков

Емкостные датчики могут непосредственно детектировать любые параметры движения (перемещение, положение), химический состав, параметры электрического поля и, конечно, определять многие другие параметры — давление, ускорение, уровень жидкости, состав жидкости и т. д.

Чтобы создать емкостной датчик, необходимо посредством варьирования детектируемого параметра произвести изменение емкости конденсатора, которое можно измерить.

Существуют различные пространственные конфигурации конденсаторов, которые можно использовать для данной цели:

- две близко расположенные параллельные пластины — плоский конденсатор;
- диск или сфера;
- цилиндр.

Проиллюстрировать, как именно могут быть созданы емкостные датчики, поможет известное выражение для емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (28)$$

где $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая постоянная (абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума); ε — значение относительной диэлектрической проницаемости материала диэлектрика; S — площадь перекрытия обкладок; d — расстояние между обкладками.

Важным в определении плоского конденсатора является значительный размер сенсорных электродов (по сравнению с расстоянием d).

Чтобы достичь изменения в емкости, необходимо добиться изменения по определенному, предпочтительно линейному, закону свойств диэлектрического материала, геометрии взаиморасположения обкладок или расстояния между ними.

Выделяются три следующих типа емкостных датчиков (рис. 65–67):

- 1) Датчики с фиксированными обкладками конденсатора: относительное положение обкладок остается неизменным, но емкость конденсатора изменяется в результате помещения близ обкладок различных материалов (рис. 65). Например, заземленный проводящий материал уменьшит емкостную связь, материал с высокой диэлектрической проницаемостью увеличит емкость. Эти датчики используются для определения состава материалов, детектирования абсолютного линейного положения (рис. 65а–б¹), присутствия детектируемых объектов (датчики близости — рис. 65в–д). Устройства данного типа легко могут быть преобразованы в массив фиксированных обкладок для детектирования двумерного положения (X–Y), если удастся получить определенный (линейный) закон изменения $\varepsilon(x)$ и $\varepsilon(y)$, или образа объекта, а также углового положения — по закону $\varepsilon(\varphi)$ (рис. 65д).
- 2) Датчики, принцип работы которых основан на изменении расстояния между двумя параллельными обкладками конденсатора (рис. 66а–в). Именно этот тип датчиков позволяет с высокой точностью детектировать малые перемещения до 10^{-14} м, так как изменение в емкости значительно, хотя и нелинейно (см. выражение (28) и рис. 66г–д). Данная способность подходит для детектирования перемещений и ускорения и практически используется в микрометрах, акселерометрах, инклинометрах. Линейность при решении многих

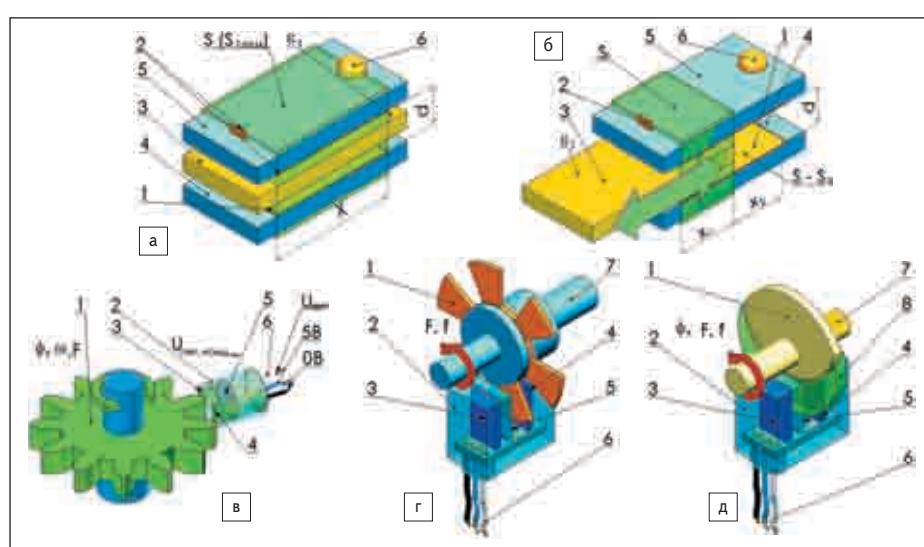


Рис. 65. Иллюстрации конструкций емкостных датчиков, физические принципы которых основаны на изменении емкости при изменении диэлектрической проницаемости $C(\varepsilon)$:

а, б — линейный емкостной датчик расстояний x_1 и x_2 :

1, 2 — нижняя и верхняя обкладки конденсатора, зафиксированные на постоянном расстоянии d , с максимальной площадью перекрытия S и полной длиной перекрытия X ; 3 — слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε_1 ; 4, 5 — зафиксированные печатные платы; 6 — пайка обкладки на плате;

а — датчик в исходном состоянии при $x_1 = X$ и $x_2 = 0$;

б — датчик с $x_1 \leq X$ и ненулевым x_2 ;

S_1 — переменная площадь перекрытия обкладок диэлектриком 3 (с диэлектрической проницаемостью ε_1) в пределах детектируемого расстояния x_1 ; $(S-S_1)$ — переменная площадь перекрытия обкладок воздушным диэлектриком (с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon \approx 1$) в пределах переменного расстояния $x_2 = X - x_1$;

в — емкостной датчик зубчатого ротора типа «открытый конденсатор»:

φ , ω , F — абсолютный и частотные сигналы датчика:

φ — сигнал абсолютного углового положения ротора; F , ω (или f) — частота ротора и следования детектируемых элементов, соответственно; 1 — ротор (из металла или диэлектрика); 2 — корпус датчика; 3, 4 — выступающие обкладки плоского конденсатора; 5 — схема питания конденсатора переменным напряжением и обработки сигнала; 6 — проводные терминалы датчика (в трехпроводной частотной схеме подключения, работающей на постоянном напряжении);

г — угловой емкостной датчик-прерыватель:

1 — ротор-крыльчатка (из металла или диэлектрика); 2 — корпус датчика; 3, 4 — обкладки плоского конденсатора; 5 — схема питания и обработки сигнала; 6 — проводные терминалы датчика (в трехпроводной частотной схеме подключения, работающей на постоянном напряжении); 7 — вращающийся вал; F , f — частотные сигналы датчика;

д — угловой емкостной датчик абсолютного положения — прерыватель:

1 — ротор с материалом, изменяющим емкостную связь (из металла или диэлектрика); 2 — корпус датчика; 3, 4 — обкладки плоского конденсатора; 5 — схема питания и обработки сигнала; 6 — проводные терминалы датчика (в трехпроводной аналоговой или частотной схеме подключения, работающей на постоянном напряжении); 7 — вращающийся вал; 8 — материал, изменяющий емкостную связь; φ , F , f — абсолютный и частотные сигналы датчика

измерительных задач достигается за счет измерения импеданса, а не емкости (рис. 66г–д). Нежелательными являются паразитная поперечная чувствительность к смещениям в направлении оси X или Y, чувствительность к наклону, паразитной емкостной связи тыльных сторон обкладок.

При добавлении между двумя фиксированными обкладками третьей подвижной обкладки, например, диафрагмы, достигается дифференциальное соединение двух конденсаторов, что позволяет увеличить чувствительность, амплитуду, улучшить линейность сигнала и обеспечить экранирование (рис. 66е–ж). Зависимость амплитуды от расстояния d снижается при наличии схемы обработки соотношения сигналов. Полученная структура датчика с подвижной обкладкой, нагруженной инерционной массой, лежит в основе большинства современных акселерометров.

Из рис. 66б–в становится понятным, что фиксирование на поверхности обкладки (рис. 66в) диэлектрического слоя, предотвращающего прилипание обкладок друг к другу при нагрузках акселерометра выше допустимых пределов, — решение, которое способствует также устранению нелинейности, наводимой вследствие неодинакового изменения диэлектрической проницаемости в дифференциальных конденсаторах с подвижным диэлектрическим слоем (рис. 66б). В отличие от акселерометров, в датчиках положения механическая нагрузка на подвижную обкладку может контролироваться извне, поэтому риск выхода за рабочие пределы датчика менее вероятен. Следовательно, может использоваться только воздушный диэлектрик (рис. 66а), но в условиях повышенной вибрации или ударов также будет полезен дополнительный диэлектрический слой, как подвижный (тогда зависимость $\varepsilon(d)$ должна

¹ Датчики, показанные на рис. 65а–б, так же, как и некоторые другие, могут быть классифицированы и как датчики с перекрытием обкладок.

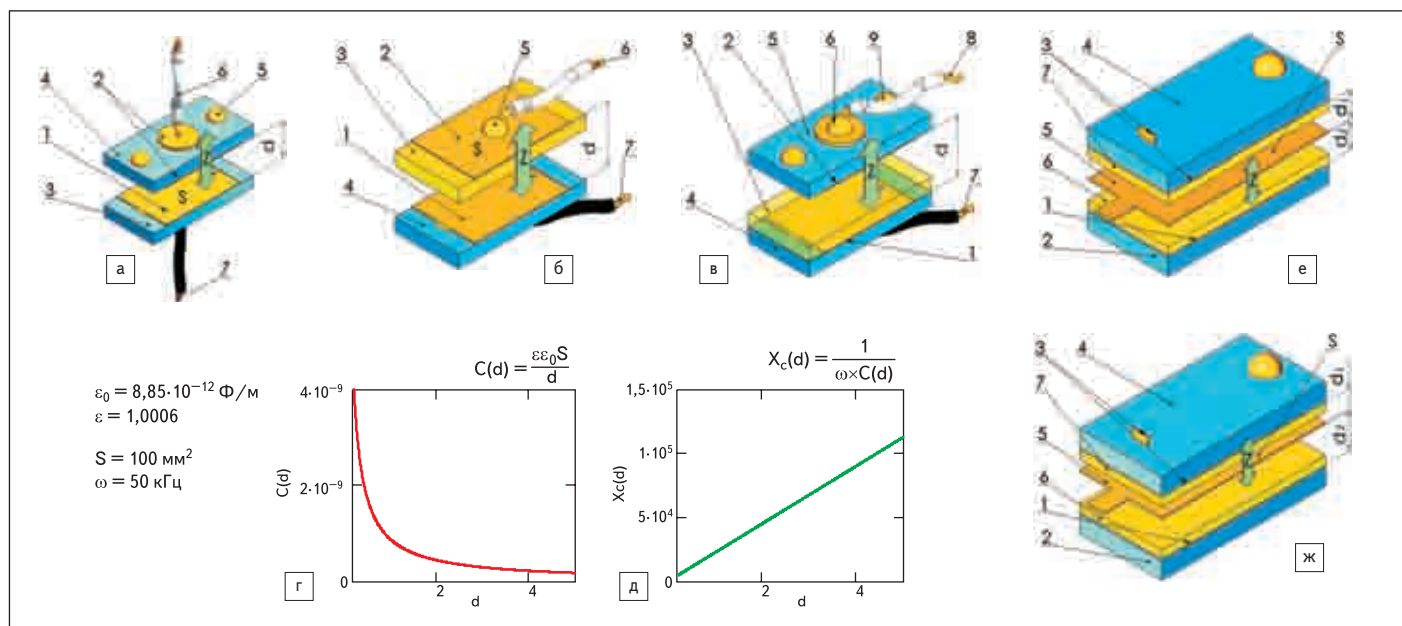


Рис. 66. Иллюстрации конструкций емкостных датчиков, физические принципы которых основаны на изменении емкости при изменении расстояния между обкладками $C(d)$:
а — линейный емкостной датчик расстояния d (в направлении оси Z) с воздушным диэлектриком и постоянной площадью перекрытия S :
1 — зафиксированная нижняя обкладка конденсатора; 2 — подвижная верхняя обкладка конденсатора; 3 — зафиксированная печатная плата; 4 — подвижная печатная плата;
5 — пайка обкладки; 6, 7 — терминалы конденсатора;
б — линейный емкостной датчик расстояния d (в направлении оси Z) с постоянной площадью перекрытия S и дополнительным подвижным защитным диэлектрическим слоем:
1 — зафиксированная нижняя обкладка конденсатора; 2 — подвижная верхняя обкладка конденсатора; 3 — защитный слой диэлектрика; 4 — зафиксированная печатная плата;
5 — пайка обкладки; 6, 7 — терминалы конденсатора;
в — линейный емкостной датчик расстояния d (в направлении оси Z) с постоянной площадью перекрытия S и фиксированным диэлектрическим слоем:
1 — зафиксированная нижняя обкладка конденсатора; 2 — подвижная верхняя обкладка конденсатора; 3 — фиксированный защитный слой диэлектрика; 4 — зафиксированная печатная плата;
5 — подвижная печатная плата или изолирующий материал; 6 — пайка обкладки и терминалов; 7, 8 — терминалы конденсатора; 9 — пайка обкладки;
г, д — функциональные характеристики датчика расстояния d :
г — изменение емкости;
д — изменение импеданса;
е, ж — дифференциальный емкостной датчик расстояний d_1 и d_2 (в направлении оси Z)
1 — зафиксированная нижняя обкладка; 2 — зафиксированная нижняя печатная плата; 3 — зафиксированная верхняя обкладка; 4 — зафиксированная верхняя печатная плата;
5 — подвижная средняя обкладка, соединяемая с детектируемым объектом; 6 и 7 — фиксированные слои диэлектрика; S — фиксированная площадь перекрытия обкладок;
е — датчик в исходном (нулевом) положении;
ж — датчик в смещенном состоянии

учитываться), так и неподвижный (с $\epsilon(d)=0$ при всех значениях d).

Высокая чувствительность позволяет использовать и стандартные, и дифференциальные типы датчиков вариации расстояния для измерения малых перемещений, но не позволяет детектировать большие перемещения, поскольку емкость конденсатора с большим расстоянием между обкладками падает до значения, которое сложно измерить, и уровень выходного импеданса значительно увеличивается. Данный тип емкостных устройств подходит для детектирования линейного абсолютного положения, но не актуален для угловых систем.

3) Датчики, в которых происходит перемещение двух параллельных обкладок друг относительно друга, одной подвижной обкладки относительно второй неподвижной или перемещение пластины диэлектрика таким образом, что изменяется рабочая область перекрытия конденсатора S (рис. 67). За счет изменения области перекрытия может детектироваться значительное линейное перемещение с соблюдением линейного закона приращения емкости (рис. 67а–б), а также угловое положение в пределах $\leq 360^\circ$

(рис. 67з и 65г–д). Однако этот тип датчиков чувствителен к зазору между обкладками d (он должен быть малым (1 мм) и не должен иметь существенных погрешностей значения), к наклону в направлении любой оси и к паразитной емкостной связи тыльных сторон обкладок.

В дифференциальном или полудифференциальном режиме (рис. 67г–ж) характеристики датчиков с перекрытием улучшаются. Если добавить вторую фиксированную обкладку выше подвижной (рис. 67е–ж), зависимость от расстояния d при этом обнуляется. В этой же конфигурации или при размещении двух неподвижных обкладок с одной стороны подвижной обкладки (рис. 67г–д) уменьшается чувствительность датчика к наклону и обеспечивается экранирование, которое уменьшает паразитную емкостную связь.

Пропорциональное считывание положения представляет собой метод измерения пропорционального изменения дифференциальных емкостей C_1 и C_2 , например $(C_1 - C_2)$, C_1/C_2 или $(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$, и выработки в схеме усилителя аналогового выхода напряжения — это позволяет также выполнять радиометричные

измерения, когда емкость одного конденсатора является переменной в процессе движения, а второго — фиксированной (полудифференциальный режим). Анализ соотношения C_1/C_2 или $(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$ в измерительной схеме позволяет уменьшать эффекты влияния температуры и изменений в диэлектрической проницаемости вследствие влажности и (или) давления.

Кроме того, при анализе соотношения емкостей типа C_1/C_2 измерительная схема с одной переменной емкостью может быть линеаризована типом движения датчика: для получения линейного выхода C_1 может быть переменной емкостью конденсатора с перекрытием обкладок (C_2 — опорная емкость), либо C_2 — переменная емкость конденсатора с вариацией расстояния d (C_1 — опорная емкость).

Для увеличения емкости датчиков (с целью повышения чувствительности и разрешения — детектирования еще меньших перемещений) и уменьшения импеданса подходят методы параллельного включения нескольких или многих конденсаторов (соединение обкладок с одинаковой полярностью). Во многих дифференциальных схе-

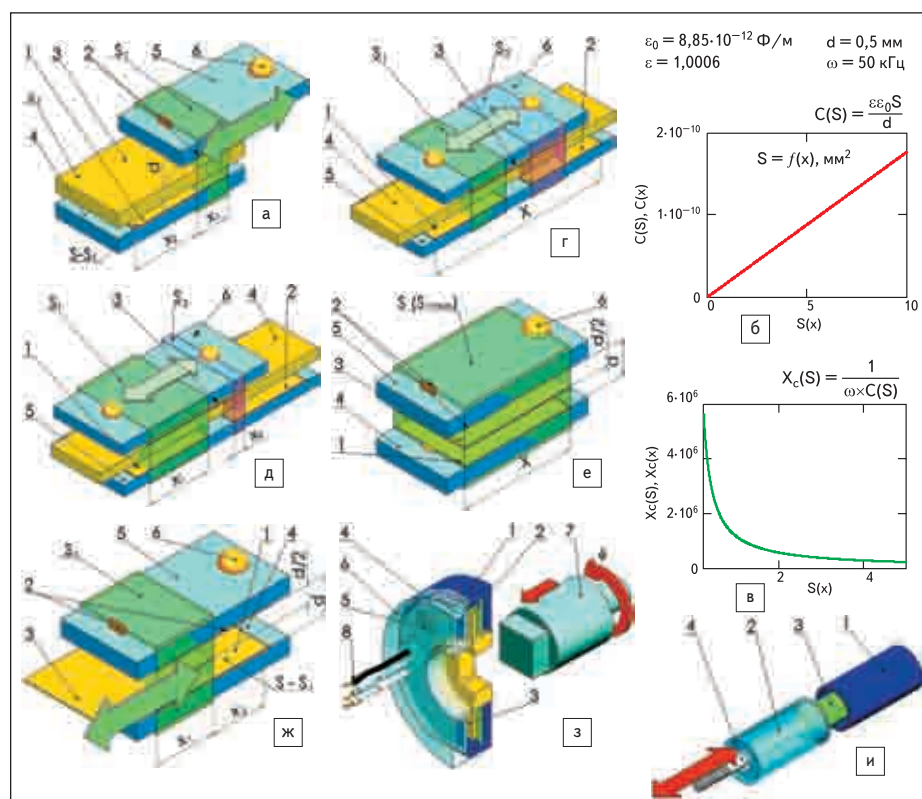


Рис. 67. Иллюстрации конструкций емкостных датчиков, физические принципы которых основаны на изменении емкости при изменении площади перекрытия обкладок $C(S)$:

а — линейный емкостной датчик перекрытия обкладок S — расстояний x_1 и x_2 в направлении оси X (на рис. 67а показан датчик с $x_1 \leq X$; датчик в исходном состоянии при $x_1 = X$ показан на рис. 65а);

1 — зафиксированная нижняя обкладка; 2 — подвижная верхняя обкладка конденсатора, отнесенная на постоянное расстояние d , с максимальной площадью перекрытия с нижней S и полной длиной перекрытия X ; 3 — зафиксированный слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ϵ ; 4 — зафиксированная печатная плата; 5 — подвижная печатная плата; 6 — пайка обкладки на плате; d — постоянное расстояние между обкладками; S_1 — переменная площадь перекрытия обкладок в пределах детектируемого расстояния x_1 ; $(S - S_1)$ — переменная площадь отсутствия перекрытия обкладок в пределах переменного расстояния $x_2 = X - x_1$;

б, в — функциональные характеристики датчика перекрытия обкладок S :

б — изменение емкости; в — изменение импеданса;

г, д — линейный датчик расстояний x_1 и x_2 — дифференциальная схема перекрытия обкладок S_1 и S_2 с полным рабочим ходом X (рефлективного типа):

1, 2 — нижние зафиксированные обкладки конденсатора; 3 — верхняя подвижная обкладка, отнесенная на постоянное расстояние d , с площадями перекрытия с нижними S_1 и S_2 соответственно; 4 — зафиксированный слой диэлектрика (с диэлектрической проницаемостью ϵ); 5 — зафиксированная печатная плата; 6 — подвижная печатная плата; г — датчик в исходном (нулевом) положении; д — датчик в смещенном состоянии;

е, ж — дифференциальный линейный датчик расстояния x_1 — площади перекрытия обкладок S_1 с полным рабочим ходом X , с воздушным диэлектриком (прерываемого типа):

1, 2 — нижняя и верхняя обкладки, зафиксированные на постоянном расстоянии d , с максимальной площадью перекрытия S и полной длиной перекрытия X ; 3 — подвижная обкладка конденсатора, отнесенная от неподвижных обкладок на постоянное расстояние $d/2$; 4, 5 — зафиксированные печатные платы; 6 — пайка обкладки на плате; е — датчик в исходном состоянии при $x_1 = X$; ж — датчик с $x_1 \leq X$; S_1 — переменная площадь перекрытия обкладок в пределах детектируемого расстояния x_1 ; $(S - S_1)$ — переменная площадь перекрытия обкладок в пределах переменного расстояния $x_2 = X - x_1$;

з — угловой емкостной трансивер:

1 — корпус (основание) датчика; 2 — неподвижная печатная плата — трансмиттер; 3 — ротор — печатная плата с емкостным аттенуатором (прерывателем); 4 — неподвижная печатная плата — ресивер; 5 — схема обработки сигнала; 6 — крышка (верхняя часть) датчика; 7 — вращающийся вал; 8 — проводные терминалы датчика; ϕ — абсолютный сигнал датчика;

и — коаксиальный «емкостной LVDT»:

1, 2 — неподвижные дифференциальные обкладки; 3 — подвижная обкладка;

4 — крепежная часть подвижной обкладки для соединения с детектируемым объектом (резьбовой наконечник)

мах два конденсатора соединяются последовательно — с чередованием полярностей обкладок — что уменьшает емкость, увеличивает импеданс, но повышает измерительную точность устройств.

Для улучшения точности применяется массив обкладок со схемой обработки, подобной оптическим энкодерам (с демодуля-

тором — счетчиком обкладок для грубого определения положения и интерполяции между обкладками для более точного измерения).

Методы устранения поперечной чувствительности датчика и паразитных емкостных связей тыльных сторон обкладок показаны на рис. 68.

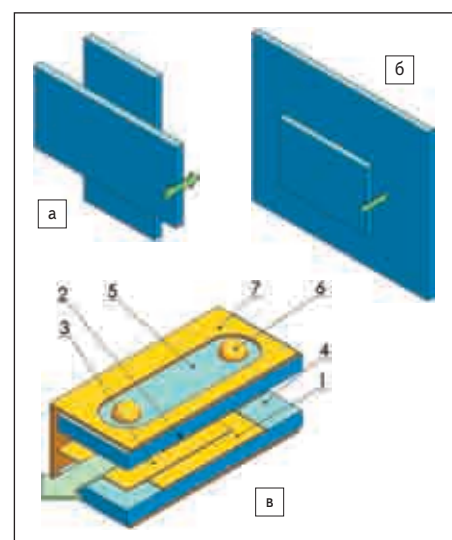


Рис. 68. Некоторые конструктивные методы повышения точности и стабильности работы емкостного датчика:

а, б — методы устранения поперечной чувствительности и паразитных емкостных связей тыльных сторон обкладок [136]:

а — underlap/overlap;

б — overlap/overlap;

в — экранирование:

1, 2 — неподвижные обкладки;

3 — подвижная обкладка; 4, 5 — зафиксированные печатные платы; 6 — пайка обкладки; 7 — экран

Экранирование используется для предотвращения паразитных емкостных связей с тыльных сторон обкладок (рис. 68в). Экранирование управляется схемой обработки сигнала: экран должен иметь тот же потенциал, что и сенсорная обкладка, для того чтобы не наводить изменения в емкости между обкладками. Если, например, одна обкладка управляется источником сигнала, а вторая подсоединена ко входу низкоимпедансного усилителя (виртуально заземлена), то экран должен быть подсоединен к земле.

В классификации емкостных устройств особое место занимают емкостные трансиверы — преобразователи высокочастотного сигнала с фиксированными обкладками. Одна из этих обкладок является трансмиттером, а другая — ресивером. Подвижная обкладка, размещенная между ними или с одной их стороны (рис. 67г-и, рис. 65г-д), выполняет функции, аналогично оптическим датчикам, прерывателя, аттенуатора или рефлектора.

Угловые датчики могут быть преобразованы разворачиванием одиночной обкладки или массива линейных обкладок, соединенных параллельно, на 360° (рис. 67з, рис. 65г-д). Наклон и смещение устраняются аналогично линейным датчикам. Угловые энкодеры обычно используют дизайн множественных обкладок, выполненных, например, по планарной толсто пленочной технологии.

Помимо плоского конденсатора могут быть использованы и другие известные геометрические конфигурации [136].

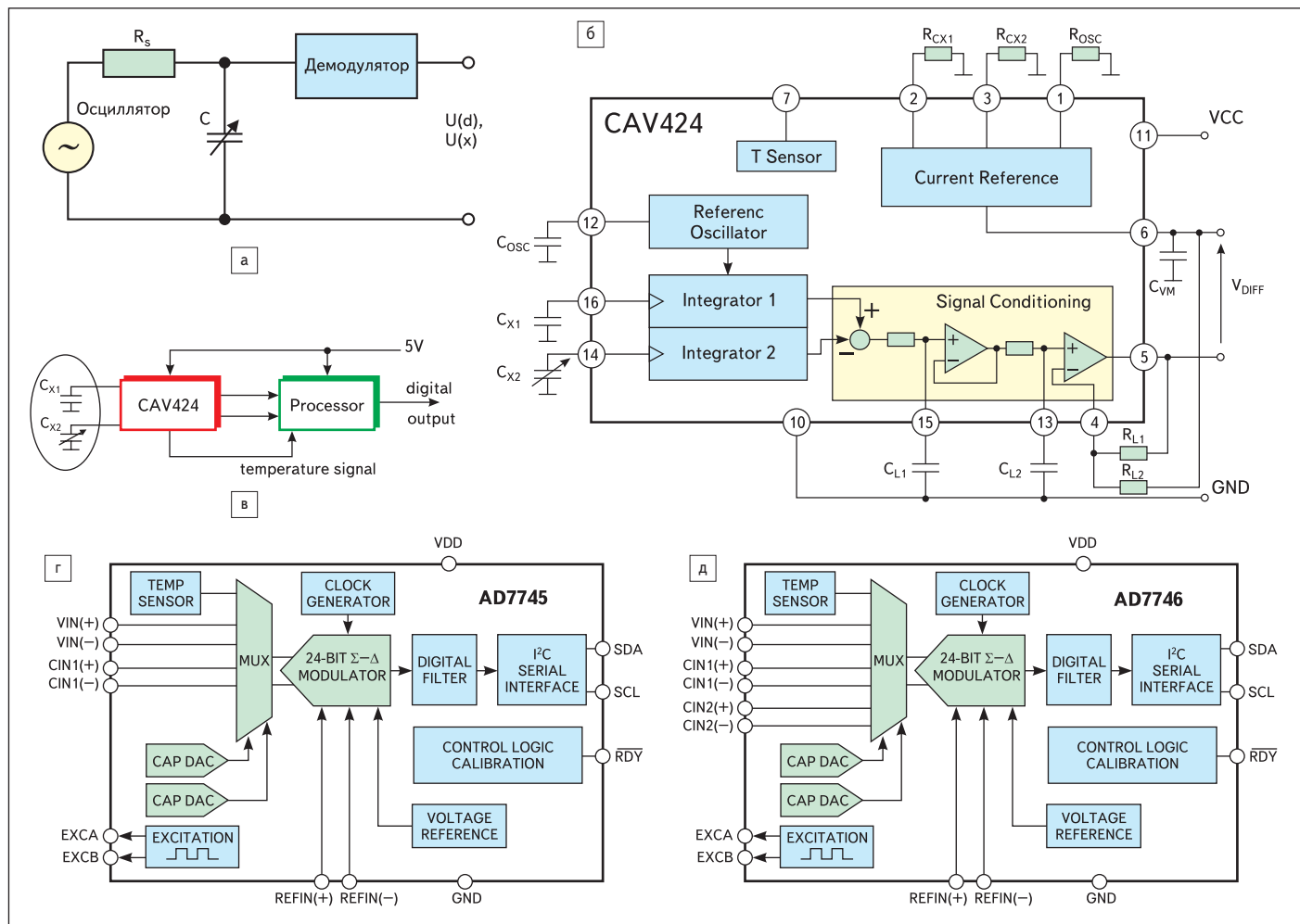


Рис. 69. Некоторые примеры схем обработки сигналов емкостных датчиков:
а — преобразователь импеданс—напряжение;
б — функциональная схема интерфейса емкостных датчиков CAV424 Analog Microelectronics;
в — концепция подключения емкостного датчика к CAV424;
г, д — функциональные схемы сигма—дельта модуляторов Analog Devices:
г — одноканальный (для подключения одного конденсатора) дифференциальный преобразователь AD7745;
д — двухканальный (для подключения двух конденсаторов) дифференциальный преобразователь AD7746;

Например, емкость двух коаксиальных цилиндров вычисляется как:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln(b/a)} L. \quad (29)$$

Емкостной аналог LVDT на основе данной конфигурации показан на рис. 67и.

Схемы обработки сигнала емкостных элементов

Основным назначением схемы обработки сигнала в емкостном датчике положения для автомобильных систем является преобразование изменений емкости (рис. 65–67) в аналоговое напряжение, токовый выход ШИМ или частотный сигнал с минимальными потерями на утечку и паразитные емкости.

Существуют различные методы снятия сигнала с конденсаторного датчика [136, 137, 139–140] (наиболее актуальные для автоэлектроники примеры показаны на рис. 69):

- метод измерения емкости датчика на постоянном токе: напряжение снимается непосредственно с обкладок конденсатора, заряженных от источника постоянного тока;
- измерение переменной емкости при заряде обкладок от одиночного считывающего импульса или последовательности нескольких импульсов, например, от микроконтроллера;
- метод измерения емкости, которая используется в качестве времязадающей в RC-генераторе;
- измерение импеданса конденсатора, питаемого переменным током, в схеме демодулятора;
- измерение емкости в схеме усилителя заряда;
- измерение емкости в схеме сигма-дельта модулятора.

Прежде всего необходимо отметить, что выходной сигнал емкостного элемента является высокоимпедансным (1–100 МОм) (рис. 66г–д, рис. 67б–в), что требует для изме-

рения напряжения схемы обработки с высокоимпедансным входом.

Первые два метода весьма просто реализуются, но их отличает чувствительность к шумам.

Третий метод осуществляет преобразование емкостных изменений в частотный или ШИМ-сигнал и также просто реализуется [136]. RC-генератор, используемый в датчиках с варьированием расстояния d между обкладками, будет образовывать линейный частотный выход с частотой, пропорциональной d . Конденсаторы с вариациями перекрытия обкладок S линеаризуются измерением ширины импульсов. Ограничения метода — низкая точность, необходимость калибровки, чувствительность к паразитным емкостям (например, кабеля) и температурному коэффициенту измерительного резистора R .

Если используется конфигурация, в которой варьируется расстояние между обкладками, логично использовать типичный подход к определению емкости, который заклю-

чается в измерении на переменном токе импеданса, например, в схеме демодулятора (рис. 66г–д, рис. 69а). Если датчик построен по принципу перекрытия обкладок, целесообразно измерять емкость или соотношение емкостей, например, в схеме зарядового усилителя (рис. 67б, в), но можно использовать и преобразователь «импеданс–напряжение».

Наибольшую точность обеспечивает схема синхронного демодулятора, в которой осуществляется измерение импеданса конденсатора или соотношения импедансов в схемах емкостных мостов [136–137, 139–140]. Снятие сигнала в этой схеме осуществляется при подаче на электроды конденсатора возбуждающего сигнала от источника питания в виде прямоугольных импульсов напряжения или тока.

Для снижения импеданса целесообразно подавать питание высокой частоты (в диапазоне от 50 кГц до нескольких мегагерц), приближающейся к резонансной. Высокие частоты помогают не только уменьшить выходной импеданс, но и максимально повысить чувствительность датчика к перемещениям и снизить уровень шумов.

Для повышения чувствительности в схеме, показанной на рис. 69а, рекомендуется увеличивать последовательное сопротивление R_s . Ограничение данной схемы заключается в том, что существует компромисс между чувствительностью и диапазоном полной шкалы: повышение чувствительности с увеличением частоты будет уменьшать детектируемый диапазон датчика и может ухудшать линейность. Диапазон и частота поэтому должны быть оптимизированы.

Важным преимуществом схемы синхронного демодулятора, объединенной с высокоимпедансным усилителем переменного сигнала, является возможность сочетания демодуляции с ФНЧ, что актуально для автомобильных систем, в которых окружающие помехи могут искажать сигнал [136].

Удобным и высокоточным является также применение усилителя заряда, который преобразует соотношение измеряемой и опорной емкостей в сигнал напряжения (один из примеров подобных схем опубликован недавно в [140]). Теоретически оба вышеописанных метода (синхронный демодулятор и усилитель заряда) могут быть реализованы в системах автоэлектроники. (Детали по реализации данных схем можно найти, например, в работах [136–137, 139–140].)

Учитывая специфику задач автоэлектроники, необходимо подчеркнуть, что наибольший интерес для автомобильных систем представляют готовые интерфейсные микросхемы, которые полностью берут на себя функции сбора сигналов измерительных элементов емкостных датчиков и включают необходимую обрабатывающую и интерфейсную электронику. Поскольку датчик подключается непосредственно к ASIC, эти ИС, размещенные на печатной плате устройства,

могут обеспечить нечувствительность сигнала датчика к емкости между выводами датчика и «землей», к кабельной емкости, а также простоту реализации схемы, линейность, низкую цену, высокую надежность и точность.

Семейство аналоговых ASIC для промышленных систем и автоэлектроники (CAN404, CAV414, CAV424) разработала немецкая компания Analog Microelectronics [141–143]. ИС, функционирующие по принципу измерения соотношения емкостей относительно опорной, содержат осциллятор, управляющий двумя симметричными интеграторами емкостей C_{x1} и C_{x2} (рис. 69б). Дифференциальный сигнал фильтруется, усиливается и подается на выходную ступень, обеспечивая линейную передаточную характеристику в широком диапазоне емкостей (10 пФ — 2 нФ; допустимые емкостные изменения варьируются в диапазоне 5–100%). Для подключения датчика к ИС требуется лишь несколько внешних компонентов (рис. 69в).

Микросхемы Analog Microelectronics рассчитаны на решение широкого круга задач детектирования положения, давления, ускорения, уровней в различных областях техники. Новейший представитель семейства — ИС CAV424 с пропорциональным аналоговым выходом, в частности, рекомендован компаниями для автомобильных систем, но диапазон рабочих температур ИС составляет только $-40...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для компенсации температурных ошибок данная ИС снабжается интегрированным датчиком температуры.

Для получения сигнала в более удобной цифровой форме (по сравнению с чисто аналоговыми способами или применением внешней цифровой коррекции аналогового сигнала) для осуществления калибровки, линеаризации и температурной компенсации, а также для передачи по кабелям значительной длины разработана эффективная технология сигма-дельта преобразователей емкости в цифровой код [140]. Сигма-дельта модуляторы поставляются в виде специализированных микросхем, позволяющих осуществить прямое подключение емкостного датчика к ИС. Входное напряжение датчика представляет собой последовательность прямоугольных импульсов, сформированную микросхемой, а выходной сигнал представляет собой выраженное в цифровой форме соотношение измеряемой и опорной емкостей. Сигма-дельта модуляторы обеспечивают высокую разрешающую способность, точность и линейность (0,01%).

Компания Analog Devices выпускает семейство преобразователей емкости в цифровой код: 24-битные CDC с интерфейсом I²C AD7745/7746 (рис. 69г–д) и AD7747 (диапазон входных емкостных изменений ± 4 пФ), а также 16-битные программируемые CDC AD7142 (SPI) и AD7142-1 (I²C), обрабатывающие диапазон емкостных изменений ± 2 пФ. Устройства рассчитаны на автомобильные условия эксплуатации ($-40...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$) и снабжаются интегрированными температурными датчиками.

ADI разработала также преобразователь импеданса в цифровой код — impedance-to-digital converter (IDC) серии AD5933. Все перечисленные выше преобразователи обеспечивают простое подключение емкостного датчика к ИС для питания обкладок и снятия сигнала с минимальным набором внешних дискретных компонентов (рис. 69).

Следует отметить, что, несмотря на высокую точность емкостных методов определения положения, окончательные характеристики линейности и точности определяют системные допуски: механические допуски, наклон и схемные погрешности. Типичная точность емкостного датчика определяется значением порядка 0,1%, и при использовании интерфейсных ИС для улучшения этого значения целесообразно особое внимание уделить конструкции датчика.

Актуальность емкостной технологии для автоэлектроники

Актуальность внедрения емкостной технологии в автомобильные системы обусловлена следующими признаками:

- бесконтактность;
- высокая чувствительность, точность, линейность;
- способность противостоять высоким температурам и давлению;
- отсутствие требований калибровки для различных металлов;
- способность детектировать диэлектрические цели, а также жидкости и газы;
- возможность функционирования в масле, любой другой смазочной или тормозной жидкости;
- нечувствительность к магнитным полям;
- высокочастотная работа;
- малый размер и компактность;
- наличие недорогих интерфейсных ИС.

Емкостные датчики в автоэлектронике

Емкостные датчики находят применение в автоэлектронике для решения разнообразного круга задач — определения влажности, ускорения, наклона, давления, уровня, смещения, перемещения и положения.

Производством емкостных датчиков автомобильного назначения занимаются известные компании: Analog Devices, Capacites, Trans-Tek (датчики положения), Texas Instruments (акселерометры, датчики перемещений), Honeywell и Vaisala (датчики влажности). Емкостные датчики используют в составе автомобильных систем компании Bosch, General Motors, Delphi, Continental Teves и Visteon.

Емкостные датчики распространены и в промышленных системах (Balluff, Baumer Electric, Sick, Lion Precision, Pepperl+Fuchs, RDP Electrosense). Кроме того, емкостные устройства, в которых отражены измерительные



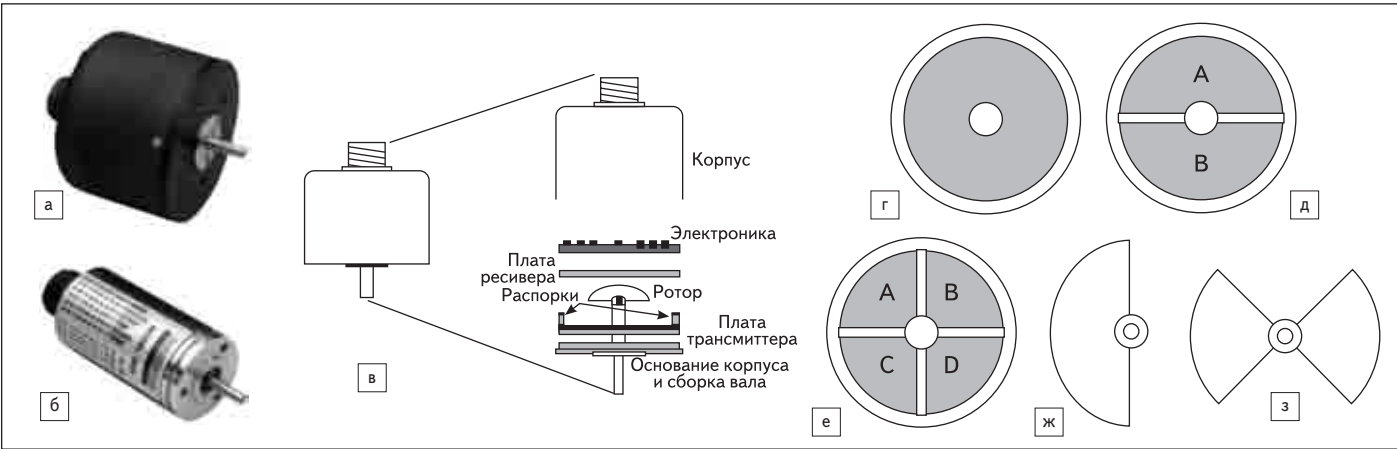


Рис. 71. Емкостные датчики компании Trans-Tek:
а — внешний вид высокоточных датчиков серии 600;
б — внешний вид датчиков общего назначения серии 0605 с возможностью детектирования угла до 300°;
в-з — иллюстрация принципа работы емкостных преобразователей: в — модульная конструкция преобразователя серии 600; г — изображение платы трансмиттера;
д, е — вид плат ресивера для детектирования угловых диапазонов в ±60° (д) и ±30° (е), соответственно; А, В, С, D — обкладки ресивера;
ж, з — роторы датчиков для версий ±60° (ж) и ±30° (з), соответственно

Таблица 16. Некоторые сравнительные технические данные угловых преобразователей ADT Trans-tek

Параметр/ датчик	ADT серии 600	ADT серии 605
Функциональное описание	Высокоточные угловые преобразователи	Угловые преобразователи общего назначения (640 версий)
Функциональный диапазон / Электрический угол, ° («+» — по часовой стрелке, «-» — против часовой стрелки)	±30 (0600—0000); +(10—70) (0601—0000); — (10—70) (0602—0000); ±60(0603—0000, (0603—0001); +(20—140) (0603—0002, 0603—0003); —(20—140) (0603—0004, 0603—0005)	(12; 30; 60; 90; 120; 180; 270; 300), все диапазоны — по часовой стрелке или против часовой стрелки
Максимальный полезный диапазон, ° («+» — по часовой стрелке, «-» — против часовой стрелки)	±40 (0600—0000); +(0—80) (0601—0000); — (0—80) (0602—0000); ±80(0603—0000, 0603—0001); +(0—160) (0603—0002, 0603—0003); —(0—160) (0603—0004, 0603—0005)	—*
Чувствительность, мВ/°	100 (0600—0000, 0601—0000, 0602—0000, 0603—0000, 0603—0001); 50(0603—0002, 0603—0003, 0603—0004, 0603—0005)	—*
Выходной интерфейс	аналоговое напряжение, биполярный или униполярный выход, специфицированный индивидуально для каждой модели	(0—5; 0—10; ±5; ±10) В; 4—20 мА
Напряжение питания, В	15 (12—16, не более 18)	14,5—26
Ток потребления, мА	30	40
Выходной импеданс, Ом	<2	<1
Нелинейность, ±% от полной шкалы	±0,05 (0600—0000, 0601—0000, 0602—0000, 0603—0001, 0603—0003, 0603—0005); ±0,1(0603—0000, 0603—0002, 0603—0004)	Специфицирована точность, включающая нелинейность, гистерезис, повторяемость и вариации отдельных изделий — <0,025% от полной шкалы; < 1% для диапазона 300°
Повторяемость, ±% от полной шкалы	<0,01	
Разрешение	бесконечное	
Регулировка смещения	±3°	—*
Максимальная угловая скорость, °/с	1,44	—*
Рабочий частотный диапазон, Гц	> 1500	>3000
Рабочий температурный диапазон, °С	0—75 (+32...158 °F); —55—125 по специальному требованию	
Температурный коэффициент диапазона, ±%/°F	—0,01 (0600—0000, 0602—0000, 0603—0000, 0603—0001, 0603—0004, 0603—0005); —0,015 (0601—0000, 0603—0002, 0603—0003)	±0,01 от полной шкалы; ±0,02 максимум
Крутящий момент, г·см	3,5; стартовый — 5 максимум	0,05; стартовый — 5 максимум
Вес, г	352	—*; ≈170
Срок службы	ограничивается сроком службы подшипников — 17 000 млн часов на скорости в 10 об/мин;	—*
Дополнительные признаки	Защита от обратной полярности и короткого замыкания выхода	Защита от обратной полярности

—* Данные отсутствуют/не специфицируются производителем

концепции, показанные на рис. 65—67, используются для решения метрологических задач и при проведении научных исследований (Physik Instrumente).

Емкостные датчики широко применяются в качестве датчиков близости — как зубчатого ротора, так и малых или крупных объектов — например, сканирования препятствий на пути автомобиля [144], факта нажатия кла-

виши (touchpad sensor) [145] или снятия образов отпечатков пальцев. (Например, автомобильные емкостные датчики человеческого тела — переключатели дверной ручки выпускает компания Arcles).

Среди компаний, перечисленных выше, выделяется только несколько, которые разрабатывали и (или) реализовали емкостную технологию именно для автомобильных задач детектирования положения — Bosch, Delphi, Delco, Ford, Methode Electronics [147—152]. И лидер в данной области — компания Trans-Tek. (Некоторые примеры показаны на рис. 70.) Разработаны концепции емкостных датчиков линейного положения, крутящего момента, а также емкостных угловых энкодеров [147—158].

Проиллюстрировать способы реализации и преимущества емкостной технологии помогут примеры емкостных трансиверов Trans-Tek. Другими интересными иллюстративными примерами современного уровня технологии и ее преимуществ при эксплуатации в автомобильных условиях могут послужить емкостные датчики компании Capacites, рекомендуемые для автомобильного тестирования.

Емкостные датчики компании Trans-Tek

Компания Trans-Tek на основе емкостной технологии производит угловые преобразователи абсолютного положения ADT (Angular Displacement Transducers) различного назначения, в том числе рассчитанные на эксплуатацию в составе систем автоэлектроники.

Линейка продукции емкостных² ADT включает (рис. 71 и табл. 16):

- Высокоточные емкостные датчики серии 600, детектирующие углы ±60° или 0—160° (табл. 16), с линейностью 0,05% (рис. 71а, в-з);
- Емкостные датчики общего назначения серии 605, детектирующие угол до 300°, с ли-

² Кроме емкостных ADT серий 600 и 605 компания Trans-Tek выпускает также оптические преобразователи — энкодеры серии 0607—0000 с возможностью детектирования угла 360°. Линейку преобразователей дополняет также система считывания и индикации сигналов оптических энкодеров серии 0607 Model 1004-0000 Display.

нейностью 0,25% (рис. 71б; внешний вид устройства показан также на рис. 2л в первой части статьи).

Емкостная технология, реализованная в преобразователях ADT, позволяет выдавать высокоточный выходной сигнал, пропорциональный углу поворота вала, в аналоговом или цифровом формате. Емкостные датчики Trans-Tek являются бесконтактными, что повышает надежность.

Преобразователь ADT представляет собой дифференциальный конденсатор с ротором, закрепленным на валу. Сенсорный элемент объединяется в корпусе преобразователя с электронной схемой (осциллятором, демодулятором и усилителем), что обеспечивает удобную работу датчика на постоянном токе.

Емкостной сенсорный элемент состоит из трех частей: трансмиттера — электрода на печатной плате (рис. 71в–г), заземленного ротора (рис. 71в, ж, з) и платы ресивера, включающей два или четыре отдельных электрода (рис. 71д–е).

Плата трансмиттера закреплена непосредственно в основании корпуса. Ротор, закрепленный на валу, вращается между передающими и принимающими электродами. Вал ротора монтируется в основании корпуса датчика посредством модуля прецизионного шарикоподшипника, закрепляемого над валом (рис. 71в).

В верхней части корпуса размещается электроника — осциллятор, демодулятор, усилитель и схема фильтрации (с фильтром 3-го порядка с возможностью высокочастотной работы).

Поскольку емкостные элементы питаются высокочастотным переменным сигналом напряжения, в устройство встроена схема, которая обеспечивает питание постоянным напряжением и получение пропорционального выходного сигнала.

К входным терминалам преобразователя прикладывается постоянное напряжение, питающее осциллятор. Осциллятор генерирует высокочастотное (400–500 кГц) переменное напряжение, подаваемое на трансмиттер.

Плата ресивера содержит 2 или 4 обкладки, форма которых определяется максимальным угловым ходом преобразователя (рис. 71д–е). Плата заземлена виртуально, в отличие от ротора, который действительно заземлен.

Хотя суммарная емкость между трансмиттером и ресивером будет оставаться постоянной, емкость между отдельными обкладками — ресиверами — будет различаться в зависимости от положения ротора. Различие в емкости между электродами-ресиверами образует выход, пропорциональный угловому положению вращающегося вала.

Например, компания Trans-Tek выпускает платы — ресиверы датчиков серии 600 в двух различных исполнениях: одна для детектирования диапазона $\pm 30^\circ$, другая — для измерения углов до $\pm 60^\circ$. Исполнение, рассчитанное на диапазон $\pm 30^\circ$, использует деление пла-

ты ресивера на 4 секции (рис. 71е). Секции А и D соединяются вместе, образуя обкладку AD, аналогично соединяются В и С (BC). В центре измерительного диапазона ротор (рис. 71з) равно охватывает секции AD и BC. Емкость при данном угловом положении ротора между трансмиттером и AD, а также между трансмиттером и BC будет равной, что обеспечивает нулевой выход напряжения.

Когда ротор вращается по часовой стрелке или против часовой стрелки, емкость одной секции относительно другой увеличивается или уменьшается, что дает дифференциальный выход, пропорциональный угловому смещению относительно нулевой точки.

Тот же рабочий принцип в несколько ином исполнении реализован в версии преобразователя в диапазоне $\pm 60^\circ$.

В отличие от серии 600, ADT серии 605 обеспечивают большую гибкость при удовлетворении клиентских требований. Датчики серии 605 поддерживают восемь различных диапазонов полной шкалы от 12° до 300° (табл. 16), пять стандартизированных выходных форматов (аналоговое напряжение или токовый выход 4–20 мА) — поддерживается в общей сложности 640 коммерчески доступных версий.

ADT серии 605 дополнительно снабжаются внутренним регулятором напряжения и характеризуются возможностью работы в частотном диапазоне до 3 кГц.

Примеры преобразователей ADT и обеспечиваемые ими характеристики иллюстрируют возможность применения емкостной технологии для автомобильных систем, в которых необходимо абсолютное, высокоточное устройство для измерения углового положения. Компания Trans-Tek рекомендует преобразователи ADT как для управления большими промышленными двигателями, так и для контроля положения автомобильной дроссельной заслонки (серия 605).

Емкостные датчики компании Capacitec

Компания Capacitec производит датчики исключительно на основе емкостных принципов измерений [159–164]. Компания создает устройства, которые могут служить прецизионным инструментом как в сфере научных исследований, так и при решении промышленных задач контроля качества. Линейка продукции компании включает:

- детекторы движения,
- датчики малого зазора,
- измерители размеров деталей,
- измерители механического напряжения материалов при деформации — экстензометры.

Продукция компании Capacitec адресована также некоторым автомобильным подсистемам, например, тормозным или контроля впрыска на дизельных двигателях (рис. 72а) [159–160]. Датчики этой компании предназ-

начены для автомобильного тестирования, испытаний и производственного контроля качества (в связи с непрерывным повышением требований к качеству продукции, поставляемой ведущими производителями автомобильных систем), а также для эксплуатации в сфере НИОКР. Потребители продукции Capacitec — компании Bosch, GM, Delphi, Visteon и Continental Teves, испытательные лаборатории в США, Европе и Азии.

Компания Capacitec разработала и выпускает специализированную линейку бесконтактных датчиков анализа износа тормозных дисков и барабанов (рис. 72б–з). Датчики, различающиеся формой корпуса — цилиндрический (HPC), резьбовой (HPT) и «кнопка» (HPB), — представляют собой прочные и высокочувствительные устройства малых размеров (диаметр HPC и HPT составляет 3,8–6,5 мм) с типичным сенсорным расстоянием 2 мм, которые позволяют получать аналоговый выход постоянного напряжения.

Например, датчик HPC-150C-H с коаксиальным соединителем сочетает в себе такие достоинства, как малый размер (3,8×19,1 мм) и высокая рабочая температура (400 °С, до 500 °С). Типичный максимальный диапазон полной шкалы равняется диаметру датчика, линейный диапазон составляет 2/3 диаметра, минимальная полная шкала — 0,1% диаметра. Поверхность датчика обеспечивает повышенную ударопрочность. Разъем, расположенный за считывающей поверхностью, рассчитан на удобную замену коаксиального кабеля.

Модульная и многоканальная электроника обеспечивает одновременное подключение аналоговых выходов и питание переменным током для лабораторных испытаний с динамометрами и постоянным — для автомобильного тестирования (рис. 72г, д, и).

На рис. 72г–з показано, что датчики смещения устанавливаются с любой стороны автомобильного тормозного диска, поодиночке или в паре, для того чтобы измерять динамический разброс параметров. Рис. 72е–з, к иллюстрируют, как переменные смещения на роторе тормоза позволяют динамически собирать и анализировать данные для получения нескольких характеристик:

- биения ротора (TIR) (рис. 72е, ж);
- вариации в толщине ротора (рис. 72з);
- конусность ротора;
- температурное расширение;
- взаимное расположение емкостных элементов;
- шатания (биения);
- овальность (рис. 72к).

Помимо испытаний на надежность, датчики помогают проверять инженерные прогнозы и (или) объяснять динамические характеристики тормозных системных компонентов.

Например, условия высокой температуры и высокого давления вследствие экстренного торможения или длительное замедление на уклоне могут деформировать барабаны тормоз-

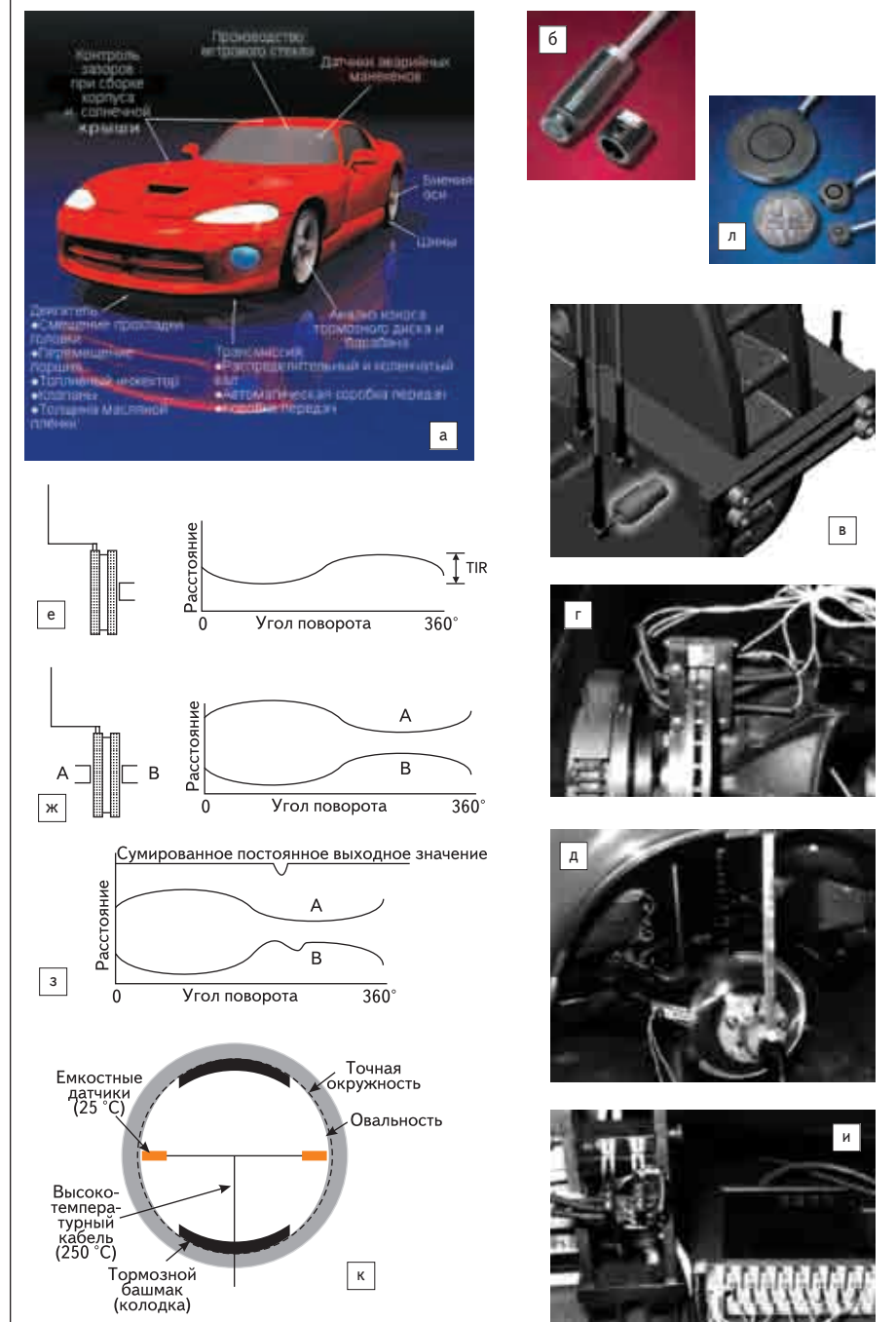


Рис. 72. Емкостные датчики компании Capacities в системах автоэлектроники:
 а — применение датчиков Capacities для контроля автомобильных подсистем;
 б — внешний вид датчика анализа износа тормозов с резьбой на корпусе;
 в — иллюстрации применения датчика анализа износа тормозов [160];
 г — общий вид датчика в автомобильной тормозной системе;
 д — пример использования датчика в лабораторных испытаниях с динамометром;
 е — пример использования датчика для тестирования автомобиля;
 ж — выходные данные датчика анализа тормозов;
 з — анализ биений с одной стороны ротора посредством одиночного датчика;
 и — анализ биений с двух сторон ротора посредством дифференциальных датчиков;
 к — анализ вариаций толщины ротора по сигналам двух датчиков;
 и — многоканальный электронный блок серии 4000 для сбора сигналов емкостных датчиков;
 к — анализ овальности внутреннего диаметра тормозного барабана грузовика в условиях экстренного торможения посредством пары емкостных датчиков [159];
 л — емкостные датчики положения для экстремальных условий эксплуатации

за в тяжелых грузовиках и модифицировать их форму от круглой к овальной (рис. 72к), вызывая тормозные сбои.

Бортовые измерения данного эффекта с применением высокотемпературных тормозных датчиков Capacities проводились ком-

панией Bosch; для оценки использовался электронный блок, прикрепленный к периферии колеса.

Компания Capacities разработала также концепцию тестирования дизельных двигателей и трансмиссий (коробок передач) с целью их соответствия федеральным стандартам в отношении экономичности (топливной эффективности) и эмиссии, а также одновременно повышения отказоустойчивости, уменьшения шума и вибрации двигателя [159].

Например, в дизельных системах инжекции топлива контролируется закрытое положение сопла инжекции: если сопло закрыто недостаточно, расходуется лишнее топливо; если закрыто чрезмерно, то появляется «звнящая» вибрация, которая приводит к преждевременным сбоям сопла. Рабочая среда характеризуется высокими магнитными полями от катушек генератора, питающих форсунку инжектора, и высокоскоростным движением штока сопла, что требует рабочей частоты датчика до 30 кГц. Датчики Capacities также снабжаются специальным согласованным с магнитной средой корпусом.

В публикации [159] приводится информация о влиянии наращивания нагара на положение поршневых колец в двигателе, смещение которых вызывает попадание масла в камеру сгорания (возгорание масла) и вызывает сопутствующие проблемы эмиссии (исследования Caterpillar Tractor).

Capacities разработала устройство для исследования данной проблемы — бесконтактный цилиндрический датчик перемещения поршней диаметром 4 мм с коаксиальным кабелем диаметром 1 мм, способный работать при погружении в масло двигателя при температурах до 250 °С. Экспериментальные исследования, проведенные компаниями AVL List GmbH и Federal Mogul с целью изучения поведения поршневого кольца, позволили получить данные, приблизившие их к пониманию сложной динамики поршневой сборки.

Важнейшим применением емкостной технологии компания Capacities считает согласованное и точное измерение различных зазоров в кузове автомобиля, которое является проблемой из-за вариаций локализации зазоров и других переменных условий и требований, в частности:

- необходимо измерять различные материалы (металл, резина, составные материалы);
- предотвращение появления царапин;
- широкий диапазон измеряемых зазоров (0,23–10 мм);
- широкий диапазон геометрии целей (плоские, радиусные, острые);
- различия в способах обработки сигналов;
- портативность измерительных инструментов.

Основываясь на своем опыте в авиационной промышленности, где форма внешних поверхностей важна для аэродинамики, безопасности, контроля шумов и экономии топлива, компания Capacities разработала ряд

контактных и бесконтактных датчиков зазора и примыкания.

Один из примеров — контроль примыкания между крепежным держателем и стеклом в люке автомобиля [159]. Стекло вначале устанавливается в приспособление с восемью датчиками, размещенными вокруг люка и контролирующими количество эпоксидного материала между стеклом и держателем, что гарантирует постоянную повторяемую геометрию для каждого люка.

Эта система измерения зазоров и примыкания позволила General Motors достигать точности порядка 100 мкм при зазорах в 1,5 мм, что положительно сказалось на аэродинамике и экономичности автомобилей.

Заключение

Многие из неинтегральных технологий, применяемые сегодня в автоэлектронике, отнесены на второй план технологическими решениями на основе интегральных микросхем, но устройства на основе магнитоуправляемых ИС не всегда могут предоставить эффективное решение задач, требующих непосредственной работы датчика в экстремальном окружении, или обеспечить высокую измерительную точность без компромисса с ценой.

Многие принципы емкостной технологии актуальны сегодня, и при правильном подходе к созданию автомобильных датчиков позволяют разработчикам автоэлектроники реализовать новые возможности. ■

Литература

136. Baxter Larry K. Capacitive Sensors: Design and Applications. IEEE Press. Dec. 1997.
137. Capacitive Sensors Offer Numerous Advantages. Contributing Author ED Online ID #7653 January 26, 1998. [ht tp: //ww w .elecdesign.c om/Articles/Index.cfm?ArticleID=7653](http://www.elecdesign.com/Articles/Index.cfm?ArticleID=7653)
138. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Часть 4. Развитие технологий и элементной базы емкостных акселерометров. //Компоненты и технологии. 2006. № 3.
139. New Integrated Interface ASICs for Capacitive Measurement Technology. Sensors, Feb 2001. Harness the Power of Δ - Σ and Switched Capacitor technologies in Signal Processing Components. Sensors, Nov 1998.

140. Брихта М. Пер. Власенко А. Преобразователи емкости в цифровой код на основе сигма-дельта модулятора. //Компоненты и технологии. 2006. № 1.
141. Interface ICs for Capacitive Measurement Technology CAN404 and CAV414. Rev. 1.2, Analog Microelectronics GmbH. Sep 2000. [w ww .analogmicro.de/products/info/english/analogmicro.en.pr1006.pdf](http://www.analogmicro.de/products/info/english/analogmicro.en.pr1006.pdf)
142. Converter IC for Capacitive Signals CAV424. Data Sheet Rev. 1.2, Analog Microelectronics GmbH, Jan 2002. [ht tp: //w ww .analogmicro.de/products/sheets/english/analogmicro.en.cav424.pdf](http://www.analogmicro.de/products/sheets/english/analogmicro.en.cav424.pdf)
143. Conversion of capacitive signals with the aid of IC CAV424. Rev. 1.3, Analog Microelectronics GmbH, Oct 2005. [ht tp: /w ww .analogmicro.de/products/info/english/analogmicro.en.pr1009.pdf](http://www.analogmicro.de/products/info/english/analogmicro.en.pr1009.pdf)
144. Capacitive proximity sensor for automotive use. US Patent 6 441 623. Оpubл. 27. 08. 2002. (AB Automotive Electronics Ltd.)
145. Capacitive proximity sensor. US Patent 6 724 324. Оpubл. 20.04.2004. (Delphi Technologies, Inc.)
146. Capacitive position sensor. US Patent 5 077 635. Оpubл. 31.12. 1991. (Robert Bosch GmbH)
147. Capacitive throttle position sensor. US Patent 5 681 990. Оpubл. 28.10.1997. (Ford Motor Company)
148. Capacitive rotary position encoder. US Patent 5 736 865. Оpubл. 07.04.1998. (Delco Electronics Corporation).
149. Liquid level sensor incorporating a capacitive rotary position encoder. US Patent 5 941 122. Оpubл. 24.08.1999. (Delco Electronics Corporation)
150. Capacitive rotary position sensor. US Patent 6 118 283. Оpubл. 12.09.2000 (Methode Electronics, Inc.)
151. Capacitive angular position sensor. US Patent 6 774 642. Оpubл. 10. 08. 2004 (Delphi Technologies, Inc.)
152. Capacitive angular position sensor. US Patent 6 876 209. Оpubл. 05. 04. 2005 (Delphi Technologies, Inc.)
153. Capacitive angular position sensor. Ferrari V., Ghisla A., Marioli D., Taroni A. и др.
154. Capacitive angular displacement transducer. US Patent 5 598 153. Оpubл. 28.01.1997
155. Capacitive angular displacement and angular rate sensor and measurement device for such transducer. US Patent 6 483 321. Оpubл. 19.11. 2002.
156. A Measurement Algorithm for Capacitive Speed Encoder with a Modified Front-End Topology. Fabian T., Brasseur G., IEEE Transactions on instrumentation and measurement, vol. 47, no. 5, october 1998.
157. Capacitive Sensor for Relative Angle Measurement. Fulmek P. L., Wandling F., Zdiarsky W., Brasseur G., IEEE, Cermak S. P. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, vol. 51, no. 6, december 2002. [w ww .pitt.e du/~qiw4/Academic/ME2082/references/3-3.pdf](http://www.pitt.edu/~qiw4/Academic/ME2082/references/3-3.pdf)
158. Radial movement capacitive torque sensor. US Patent 6 955 097. Оpubл. 18. 10. 2005 (BEI Sensors & Systems Company, Inc.).
159. Manning B., Foster R., Capacitec, Inc. Noncontact Displacement Sensors in Automotive Manufacture. SENSORS, Oct 2000.
160. Disc Brake Wear Analysis Sensors. Техническая информация Capacitec Inc., 2001. [ht tp: /w ww .capacitec.c om/PDFs/BRAKEPROBEBRO.PDF](http://www.capacitec.com/PDFs/BRAKEPROBEBRO.PDF)
161. Foster R. L., Manning B., Capacitec, Inc. Using Capacitive Noncontact Sensors to Control Coater Gap Uniformity. SENSORS, October 2002.
162. Manning B., Foster R., Capacitec, Inc. Industrial Control with Noncontact Displacement Sensors. Sensors, Sept 1999.
163. Bindra A. Noncontact Displacement Sensors Bring Quality To Auto Assembly Lines. [ht tp: /w ww .elecdesign.c om/Articles/Index.cfm?ArticleID=4328](http://www.elecdesign.com/Articles/Index.cfm?ArticleID=4328)
164. Manning B., Foster R., Capacitec, Inc. Capacitive Density Sensors Help Detect Avalanche Conditions. Sensors, march 2002.