

Автомобильные датчики положения

Современные технологии и новые перспективы

Часть 8. Классические индуктивные преобразователи — надежный запас

Светлана СЫСОВЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

Данная публикация продолжает анализ современных технологий, предоставляющих значительные преимущества в создании бесконтактных автомобильных датчиков, но которые, в отличие от большинства рассматриваемых ранее классов устройств, позволяют производить на их основе преобразователи, доступные сегодня только в неинтегральном исполнении.

В статье последовательно обосновывается актуальность применения в автоэлектронике различных типов индуктивных преобразователей — от классических линейных дифференциальных трансформаторов LVDT до новейших планарных индуктивных или магнитоиндуктивных датчиков.

В настоящей публикации подробно рассматриваются два базовых типа индуктивных устройств — дифференциальные трансформаторные датчики LVDT и RVDT.

Введение

Индуктивные датчики применяются в различных сферах промышленности и основываются на простом, надежном и функциональном инженерном дизайне электроме-

хических преобразователей, технология производства которых была значительно усовершенствована в течение нескольких последних десятилетий [3, 4, 11, 117–119].

Индуктивные преобразователи широко используются в промышленных системах, но высокая надежность, сравнительно низкая стоимость и ряд других неоспоримых достоинств — бесконтактный принцип действия, практически неограниченный срок службы и неограниченная разрешающая способность, широкий рабочий температурный диапазон и т. д. — делают их пригодными для использования в качестве автомобильных устройств.

Класс индуктивных преобразователей в автоэлектронике объединяет сенсорные устройства с общим принципом действия,

основанным на пропорциональном изменении индуктивности сенсорного элемента датчика при механическом движении детектируемого автомобильного объекта.

Внутри катушки, питаемой переменным током (рис. 50а), может быть получено только поступательное движение ферромагнитного сердечника, являющегося частью автомобильной системы. Подобные исполнительные механизмы широко применяются в автоэлектронике, например, аналогичным образом функционирует электромагнитный клапан продувки адсорбера. В ШИМ-клапане, управляемом током, может быть получено и прямое, и возвратное движение сердечника с различными скоростями (соответствующими различному расходу воздуха). Обратное мехатронное преобразование

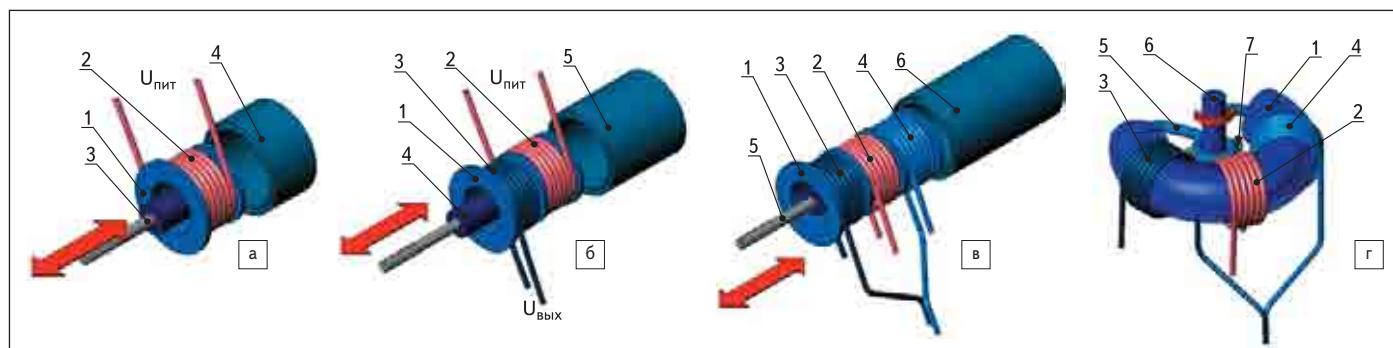


Рис. 50. Иллюстрации физических конструкций и принципов работы базовых типов электромеханических/электромагнитных устройств — клапана, трансформаторных преобразователей: базовой трансформаторной схемы, LVDT и RVDT:

а — исполнительное устройство — электромагнитный клапан:

1 — изолирующий каркас; 2 — обмотка клапана; 3 — ферромагнитный сердечник с резьбовым наконечником; 4 — корпус (гильза) клапана;

б — электромеханический трансформатор — базовая схема индуктивного преобразователя (датчика): 1 — изолирующий каркас; 2 — первичная обмотка трансформатора; 3 — вторичная обмотка; 4 — ферромагнитный сердечник с резьбовым наконечником; 5 — корпус (обойма) преобразователя;

в — иллюстрация физической конструкции LVDT: 1 — изолирующий каркас; 2 — первичная обмотка; 3, 4 — дифференциально соединенные вторичные обмотки; 5 — ферромагнитный сердечник с резьбовым наконечником; 6 — корпус (обойма) LVDT;

г — иллюстрация реализации RVDT (упрощенный вариант; корпус (обойма) RVDT условно не показан): 1 — изолирующий каркас — тороид; 2 — первичная обмотка; 3, 4 — дифференциально соединенные вторичные обмотки; 5 — ферромагнитный сердечник, соединенный с вращающимся валом; 6 — вращающийся вал; 7 — крепеж сердечника

в данном исполнительном устройстве выполнено быть не может: чтобы получить индуктивный сенсорный элемент — детектор механического положения сердечника, необходимо освободить терминалы катушки для снятия сигнала и подать переменное магнитное поле.

Индуктивное преобразование механического движения в электрический сигнал может быть получено, например, в трансформаторе, первичная (возбуждающая) обмотка которого питается переменным током постоянной частоты; тогда с выхода вторичной обмотки с подвижным ферромагнитным сердечником снимается генерируемый синусоидальный сигнал, амплитуда которого зависит от положения сердечника (рис. 50б).

Напряжение первичной обмотки трансформатора определяется по формуле [11]:

$$U_{num1} = 4,44f \times n \times \Phi. \quad (23)$$

Здесь f — частота переменного тока (Гц); n — число витков обмотки, пересекаемых магнитным потоком Φ .

Выходное напряжение $U_{вых2}$ вторичной обмотки без сердечника с тем же числом n витков за счет омических потерь несколько меньше ($\approx 5\%$).

Импеданс вторичной обмотки с сердечником зависит от величины магнитного потока при различных положениях сердечника, который концентрирует магнитный поток (новейшие технологии стремятся использовать не ферромагнитные, а проводящие материалы, например, нержавеющую сталь, алюминий или медь, способствующие наведению вихревых токов, которые также изменяют импеданс обмотки [118]).

Согласно закону Фарадея, ЭДС, наводимая при движении сердечника, зависит также от скорости перемещения сердечника:

$$E = n \times \frac{d\Phi}{dt}, \quad (24)$$

где $\frac{d\Phi}{dt}$ —

скорость изменения магнитного потока.

Отчасти в связи с этим наибольшее распространение на практике получили не двухсекционные трансформаторы, а трехсекционные или многосекционные индуктивные преобразователи дифференциального типа (с дифференциальным расположением обмоток — как статорных, так и роторных), в том числе и подробно рассматриваемые далее LVDT или RVDT, — обеспечивающие независимость параметров датчика от окружающей среды, осевых и радиальных биений подвижного элемента, механической вибрации и т. д. (рис. 50в-г, 51) [11, 117–118].

Так, в цифровых системах, например для контроля положения зубчатой рейки топливного насоса высокого давления, точная цифровая информация о положении с использованием встроенной схемы снимается

именно посредством преобразования в активный сигнал взаимного соотношения индуктивностей отдельных секций обмоток.

На практике используется также один из вариантов двухсекционного трансформаторного датчика — так называемый полумостовой LVDT, в котором возбуждающее напряжение подается на последовательно соединенные обмотки, и при движении сердечника анализируется изменение индуктивности одной из обмоток по отношению к их суммарной индуктивности.

Переменный электрический сигнал с терминалов вторичной обмотки (обмоток) амплитудой, изменяющейся во времени, будет давать абсолютную выходную характеристику перемещения сердечника. Данная особенность является преимуществом: в сравнении с инкрементальным выходом энкодеров, которые теряют информацию о положении при сбоях питания, любой абсолютный выход датчика положения более предпочтителен.

Напротив, при необходимости, посредством схем обработки сигнала, встроенных в датчики, показанные на рис. 50б-г, может быть получен любой инкрементальный или абсолютный цифровой, ШИМ или аналоговый интерфейс.

Так же, как и магнитоуправляемые интегральные датчики, индуктивные датчики нечувствительны к загрязнениям — пыли, маслу и т. д., и вредным факторам окружающей среды — влажности, коррозии. В отличие от оптических энкодеров и даже магнитоуправляемых ИС, индуктивный принцип допускает работу при очень высоких температурах — порядка 200–500 °С, которая может быть снижена только ввиду наличия интегрированной в датчик электроники обработки сигнала.

Из-за специфики применения большинства интегральных магнитоуправляемых технологий в автомобильной мехатронике оптимальные результаты обеспечиваются при детектировании именно углового абсолютного положения, (например, угловые энкодеры Холла).

Напротив, физическое воплощение индуктивного датчика углового положения будет связано с большими сложностями: в этом случае катушка будет иметь форму, подобную тороиду (см. рис. 50г), при этом перемещение оси сердечника должно выполняться по окружности (один из примеров RVDT запатентован [119]).

Относительно часто в автомобиле выполняется механическое преобразование вращения автомобильных объектов в линейное движение сердечника внутри многосекционной катушки. Например, соленоидно-плунжерный датчик, показанный на рис. 51, функционирует, используя линейное перемещение сердечника в pedalном приводе при повороте вращающегося вала, связанного с pedalью [11]. Выходное напряжение измерительной катушки пропорционально изменению индуктивности, линейному переме-

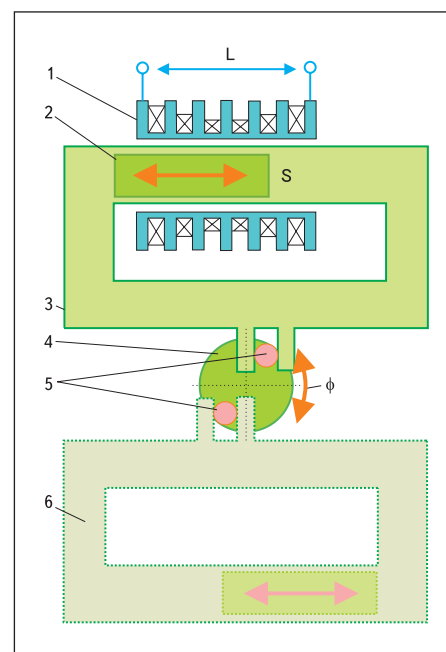


Рис. 51. Соленоидно-плунжерный датчик с pedalным приводом [11]:
1 — многосекционная катушка индуктивности;
2 — ферромагнитный сердечник;
3 — пластмассовая направляющая;
4 — вращающийся вал;
5 — ведущие штифты;
6 — резервная система;
L — переменная индуктивность;
φ — угол поворота вала;
S — линейное перемещение сердечника

щению сердечника, а, следовательно, углу поворота ротора.

Таким образом, индуктивные датчики, аналогично показанным на рис. 50–51, идеально подходят для регистрации именно линейного движения и могут быть использованы в автоэлектронике там, где преобразование линейного движения в угловое и (или) использование эффектов Холла, АМР или ГМР нецелесообразно.

Индуктивные датчики являются бесконтактными: в конструкции датчика присутствует значительный физический зазор, отделяющий электрическую и механическую части друг от друга, что согласуется с целями уменьшения износа и реструктуризации компонентов и повышает надежность.

Благодаря собственным функциональным, конструктивным улучшениям, а также технологическим достижениям и развитию твердотельной обрабатывающей электроники, и в XXI веке индуктивные сенсорные технологии остаются весьма популярными в автоэлектронике.

Например, автомобильные индуктивные датчики составляют значительную долю в линейке продукции компании Schaevitz Sensors Div. (подразделение Measurement Specialities) — одного из лидеров в области трансформаторных и индуктивных датчиков. Эта линейка представлена разнообразными сериями датчиков Schaevitz LVDT/RVDT, LVIT/RVIT, LCIT



Рис. 52. Некоторые примеры различных индуктивных преобразователей автомобильного назначения:

а, б — LVDT Applied Measurements для автомобильных OEM-применений:

а — стандартная серия датчиков AML/E;

б — серия миниатюрных датчиков AML/M;

в — спектр продукции автомобильного назначения Active Sensors, включая LVDT;

г — спектр продукции LVDT для промышленной и автомобильной эксплуатации и задач автомобильного тестирования Honeywell Sensotec;

д-л — спектр продукции LVDT автомобильного назначения Microstrain — дифференциальные преобразователи переменной индуктивности DRVT (Differential Variable Reluctance Transducer), с сердечником из материала NiTi:

д, е — DRVT для автомобильных задач контроля положения в гидравлических и пневматических цилиндрах:

д — стандартные измерительные DRVT;

е — полумостовой DRVT «средних» размеров ($\varnothing 4,76$ мм, длина рабочего хода — 8,24 или 36 мм) — увеличенная версия микроминиатюрного DRVT;

ж, з-и, к, л — DRVT для контроля положения автомобильных миниатюрных элементов (микроминиатюрные датчики — из числа самых малых LVDT, известных в мире):

ж — микроминиатюрный датчик линейных перемещений с аналоговым выходом;

з, и — микроминиатюрный DRVT-линейный измеритель;

к — измерительные DRVT «средних» размеров;

л — DRVT-индуктивные датчики зубчатого ротора с двумя дифференциальными обмотками;

м, н — LVDT HBM:

м — стандартные LVDT серии WA HBM для контроля сборки коробки передач;

н — миниатюрные LVDT серии WI для автомобильного тестирования;

о — спектр продукции датчиков углового положения RVDT /RVIT Shaevitz;

п — LVDT Shaevitz для контроля автомобильной подвески серии M-12;

р — RVDT 1380 Macrosensors;

с — спектр продукции RVDT /LVDT Penny+Giles автомобильного назначения;

т — RVDT Penny+Giles автомобильного назначения, в том числе для спортивных автомобилей;

у — драйвер SCM100 Penny+Giles для LVDT серий AF111 (для жестких условий автомобильных исследований) и AF145 (для жестких условий автомобильной эксплуатации)

(рис. 52), рассчитанными на различные диапазоны измерений и работающими от переменного или постоянного тока. К числу ведущих производителей индуктивных датчиков положения именно автомобильного назначения относятся компании BEI Duncan

и Hella (производство планарных индуктивных датчиков), компания Penny + Giles Controls (LVDT и RVDT для спортивных автомобилей), MacroSensors (LVDT и RVDT), Honeywell Sensotec (LVDT), Microstrain (LVDT) и HBM (LVDT) — производители ин-

дуктивных преобразователей для автомобильного тестирования.

Выделяются следующие автомобильные индуктивные технологии:

- дифференциальные трансформаторные преобразователи (LVDT/RVDT);

Таблица 14. Сравнительные технические данные некоторых LVDT и RVDT автомобильного назначения							
Параметр/датчик	LVDT серии AML/E Applied Measurements	LVDT серии WA HBM	LVDT M-12 Schaevitz Sensors	DVRT Microstrain	LVDT AF145 Penny + Giles	RVDT D45600 Penny + Giles	RVDT R1380 MacroSensors
Назначение	Автомобильное тестирование	Контроль качества сборки узлов автомобиля	Контроль сборки автомобильной подвески	Контроль автомобильных миниатюрных элементов	Автомобильная и промышленная эксплуатация в тяжелых условиях	Контроль двигателя спортивного автомобиля	Контроль углового положения в системах, требующих высокой надежности (датчики положения педали автопогрузчиков, укладчиков, тележек, газонных тракторов, положения дресселя в лодках, кранах, сельскохозяйственных транспортных средствах и др.)
Диапазон, мм/Электрический угол, градус	±0,5...550 мм	(2, 10, 20, 50, 100, 200, 500) мм	±(10, 20, 30, 50, 100) мм; доступны модели с ходом 5–150 мм	3, 6 и 9 мм	5–150: 5, 15, 25, 50, 75, 100, 125, 150 мм или ±(2,5; 7,5; 12,5; 25; 37,5; 50; 62,5; 75) мм	Электрический угол ±60° (120° — полный диапазон)	Электрический угол ±50° (R 1380–100) или 0–100° (R 1380–300, R 1380–400, R 1380–500)
Чувствительность, мВ/В	—*	80±0,8	(42,0; 21,2; 10,0; 9,9; 7,1) мВ/В/мм	специфицируется как 2 В/мм	—*	—*	—*
Выходной интерфейс	перемен. напряжение (амплитуда порядка нескольких мВ), пост. напряжение 0–5 В или 0–10 В, токовый выход 4–20 мА, биполярное напряжение ±2,5 В	регулируемый чувствительностью 10, 80 мВ/В или выход 0,5–10 В	регулируемый чувствительностью (см. выше)	Линейный аналоговый выход	пропорциональная схема; электрический выход на предельных значениях (0,3; 0,4 или 0,6) специфицируется для каждой модели с данным рабочим ходом	пропорциональная схема; выход на ±60° — 0,504	Биполярный выход постоянного напряжения ±10 В (R 1380–100) в диапазоне угла поворота вала 0°...±50° или, в диапазоне угла 0°...+100°, униполярный аналоговый выход напряжения 0,5–4,5 В (R 1380–300) или тока (4–20 мА) — R 1380–400, R 1380–500
Число проводов	3–6	4–6	6	—*	5	6	2–4 (возможны варианты)
Напряжение питания, несущая частота	перемен. напряжение (2–5 В, частота 2–5 кГц), нерегулируемое пост. напряжение 10–30 В в зависимости от типа датчика или регулируемое напряжение 12 В	перем. напряжение 2,5 или 0,5–10 В, частота 4,8 ±1% кГц	перем. напряжение 3 В, частота 2,5 кГц	—*	перем. напряжение 1–10 В, частота 400 Гц–12,5 кГц	перем. напряжение 3 В, частота 2 кГц	±15 В (R 1380–100) или ±5 В (R 1380–300), 16–28 В (R 1380–400), 18–28 В (R 1380–500)
Ток потребления, мА	35 при 15 В или 12 В в зависимости от типа датчика (специфицируется не для всех моделей)	—*	—*	—*	—*	—*	±20 мА (R 1380–100) или 20 (R 1380–300), 40 (R 1380–400), 4–20 мА (R 1380–500)
Нелинейность, ±% от полной шкалы	<0,5	±0,2...0,1	±0,25 максимум	для 9 мм: 0,75 за 9 мм; 0,3 за 5 мм; для 6 мм: 1 за 6 мм; 0,3 за 3 мм; для 3 мм: 1,5 за 3 мм; 0,5 за 1 мм	0,25 для датчиков с эффективным ходом ≤75 мм и 0,125 для датчиков с ходом более 75 мм	1 — в диапазоне угла 0...±50°; 2 — в диапазоне угла 0...±60°	<±0,25
Повторяемость, ±% от полной шкалы	<0,1	—*	—*	Специфицируется как ±1 мкм	—*	—*	—*
Максимальная выходная амплитуда	30 мВ или 0,1% на 20 мА (для устройств постоянного тока)	—*	—*	—*	переменное напряжение 3,3 В		—*
Рабочий температурный диапазон, °С	–30...+85 — стандартный; –30 ...+150 — опционно	–40...+80 (+150)	—*	– 55...105	–35...+125	–40...+180	–20...+85
Температурный коэффициент нуля (смещения), ±% рабочего хода/°С	<0,020 или <0,010, в зависимости от типа датчика	<±0,1	0,5 максимум	0,0029	максимальная температурная ошибка 0,0012–0,0030	—*	—*
Температурный коэффициент диапазона (чувствительности), ±% рабочего хода/°С	<0,020 или <0,030, в зависимости от типа датчика	<±0,1	—*	0.03		—*	–0,01
Виброустойчивость	20g до 20 кГц	15 g при 5–65 Гц в течение 0,5 часа	—*	—*	10 Гц–2 кГц, 4,12 g;	—*	10 g, 50–2000 Гц
Устойчивость к ударным нагрузкам, g за мс	1000g за 10 мс	65 g за 3 мс; 100 циклов	—*	—*	—*	—*	100 g, 11 мс
Класс защиты	IP54	IP67 (IP54)	—*	—*	IP66	—*	IP66
Срок службы, млн циклов полной шкалы	—*	10	—*	>20	—*	—*	—*
—* Данные не специфицируются производителями							

- индуктивные датчики с вихревыми токами (переменным импедансом);
- толстопленочные индуктивные датчики с планарными обмотками, размещенными на плате (например, LVIT/RVIT Schaevitz);
- высокочастотные преобразователи, принцип работы которых основан на вихревых токах (LCIT/RCIT Schaevitz);
- высокочастотные толстопленочные преобразователи угла или линейного положения с планарными обмотками и индуктивным аттенуатором BEI — Duncan;
- ряд других, основной целью которых является повышение эффективности неинтегральных индуктивных устройств и устранение различных недостатков, существующих ввиду особенностей их исполнения [3, 4, 11, 117–119].

Еще одним специальным видом индуктивных преобразователей являются магнитоин-

дуктивные датчики, предназначенные для использования в автоэлектронике, (производимые, например, SiemensVDO). Принцип действия данного типа датчиков основан на изменении индуктивности обмоток при движении постоянного магнита относительно индуктивного сенсорного элемента.

Сравнительный анализ преимуществ и недостатков различных технологий датчиков, включая индуктивные и магнитоиндуктивные, обоснование целесообразности и актуальности их применения в автоэлектронике являются основной задачей настоящего цикла.

Обзор и анализ технологий индуктивных преобразователей LVDT и RVDT, выполненный в настоящей публикации, является исключением из общего правила, поскольку основные сферы применения LVDT и RVDT, а также многих других индуктивных устройств и технологий сконцентрированы

не в автоэлектронике (где они также применяются, например, для контроля двигателя, коробки передач, сцепления, тормозов в спортивных автомобилях), а в промышленности (в том числе автомобильной) и авиации.

Спектр продукции ведущих производителей LVDT и RVDT автомобильного назначения показан на рис. 52. Технические характеристики некоторых LVDT и RVDT, в том числе датчиков, предназначенных для автомобильной промышленности, приведены в таблице 14.

Одновременно, значительную долю продукции известных производителей датчиков различных типов для автоэлектроники Kavlico Corporation или Trans-Tek составляет продукция авиационного назначения (LVDT/RVDT Kavlico) или номенклатура датчиков, предназначенная для промышленного использования (LVDT Trans-Tek) (см. рис. 53).



Рис. 53. Некоторые примеры преобразователей LVDT / RVDT промышленного и авиационного назначения:

- а — LVDT Ixthus Instrumentation промышленного назначения;
- б—д — LVDT / RVDT Kavlico Corporation:
- б — спектр продукции LVDT / RVDT Kavlico Corporation;
- в — RVDT Kavlico Corporation различного назначения, работающие на постоянном токе;
- г — многоканальные RVDT Kavlico Corporation авиационного назначения;
- д — прецизионные RVDT с встроенными передачами;
- е — промышленные датчики положения LVDT Monitran;
- ж, з — спектр продукции LVDT Trans-Tek промышленного назначения:
- ж — миниатюрные измерительные LVDT серии 330, работающие на переменном токе для измерения толщин материалов, профилирования поверхности и т. д.;
- з — LVDT общего назначения серии 350 DC, работающие на постоянном токе;
- и, к, л — датчики Schaevitz Sensors:
- и — LVDT Schaevitz серии MP промышленного назначения;
- к — промышленные RVDT Schaevitz RSYN, работающие на переменном токе;
- л — RVDT Schaevitz R30D, работающие на постоянном токе, для контроля гидравлических насосов, определения положения дроссельного рычага и др.;
- м — индуктивные LVDT серии SL и обработчик сигналов для автомобильной промышленности Waycon;
- н — LVC-2412 — новинка 2005 года от MacroSensors — обработчик сигналов LVDT, RVDT и полумостовых индуктивных датчиков, работающий от 12/24В постоянного тока 2412;
- о — модуль питания PSD 4-15 для Schaevitz DC LVDT, работающих на постоянном токе, RVDT и датчиков давления

Дифференциальные трансформаторные датчики (LVDT и RVDT)

Простейшей формой представления дифференциального трансформаторного датчика (ДТД) является статический трансформатор из одной первичной и двух вторичных обмоток (рис. 54). Линейное или угловое перемещение ферромагнитного сердечника внутри обмоток трансформатора создает электромагнитный дисбаланс, переводимый в пропорциональное электрическое изменение выходного напряжения обмоток.

Линейный или угловой ДТД может быть усложнен до трансформатора с массивом обмоток как показано на рис. 51, но на практике наиболее часто используется

именно простейшая форма ДТД, показанная на рис. 50в-г и 54.

Линейные дифференциальные трансформаторы переменной индуктивности LVDT (Linear Variable Differential Transformer) представляют собой бесконтактные электромеханические преобразователи, которые образуют электрический выход аналогового напряжения, пропорциональный линейному перемещению подвижного ферромагнитного сердечника (рис. 50в, 54а) [117].

Угловые дифференциальные трансформаторы переменной индуктивности (RVDT — Rotary Variable Differential Transformer) используют тот же самый принцип, что и LVDT-датчики, для измерения углов поворота, и, следовательно, сердечник в конструкции датчика является вращающимся (рис. 50г, 54б) [119].

Принцип работы ДТД основан на пропорциональном изменении индуктивности одной вторичной обмотки относительно другой при движении сердечника. В присутствии на первичной обмотке возбуждающего переменного напряжения (тока) постоянной амплитуды с частотой 50 Гц — 10 кГц (стандартное значение — 2,5 кГц), напряжения, наводимые первичной в каждой линейной обмотке, являются функциями линейного смещения (прироста углового положения) сердечника, и отличаются противоположной полярностью (рис. 54в-е). (При приближении сердечника к обмотке ее индуктивность увеличивается, соответственно, удаление сердечника от противоположной обмотки уменьшает ее индуктивность.)

Это означает, что если выводы вторичных обмоток соединяются между собой последовательно в режиме «push-pull», как показано на рис. 50в-г и 54, и сердечник расположен симметрично относительно центра первичной обмотки, выходные напряжения вторичных обмоток, равные по величине и имеющие противоположную полярность, дадут при таком способе включения нулевое выходное напряжение датчика (с малым переменным напряжением смещения).

Такое включение обмоток образует дифференциальный трансформаторный датчик: изменение индуктивности магнитной схемы при смещении сердечника из нулевого положения генерирует переменное выходное напряжение (рис. 54а, б, д, е), амплитудное значение которого вычисляется по формуле:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вых1}} + U_{\text{вых2}}. \quad (25)$$

Во внешней схеме обработки переменное напряжение обычно выпрямляется или демодулируется для образования дифференциального аналогового выхода постоянного напряжения, линейно пропорционального величине перемещения относительно нуля, с полярностью, индуцирующей направление рабочего хода (рис. 54ж).

Если вместо дифференциального соединения обмоток (рис. 54а, б) во внешней схеме обработки для получения выходного сигнала анализируется пропорциональное соотношение между напряжениями $U_{\text{вых1}}$ и $U_{\text{вых2}}$, то будет получена так называемая пропорциональная схема трансформаторного датчика.

Пропорциональный метод, согласно которому анализируется не сумма напряжений¹, а коэффициент

$$K = \frac{U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}}}{U_{\text{вых1}} + U_{\text{вых2}}}, \quad (26)$$

является более высокоточным.

Физическая точка пространства в центре первичной обмотки (для LVDT — в центре датчика) в обоих случаях является отсчетным, или нулевым, положением. Нулевое положение RVDT обязательно маркируется на валу и корпусе датчика. Масштабирование анало-

¹ При дифференциальном включении обмоток напряжения алгебраически вычитаются.

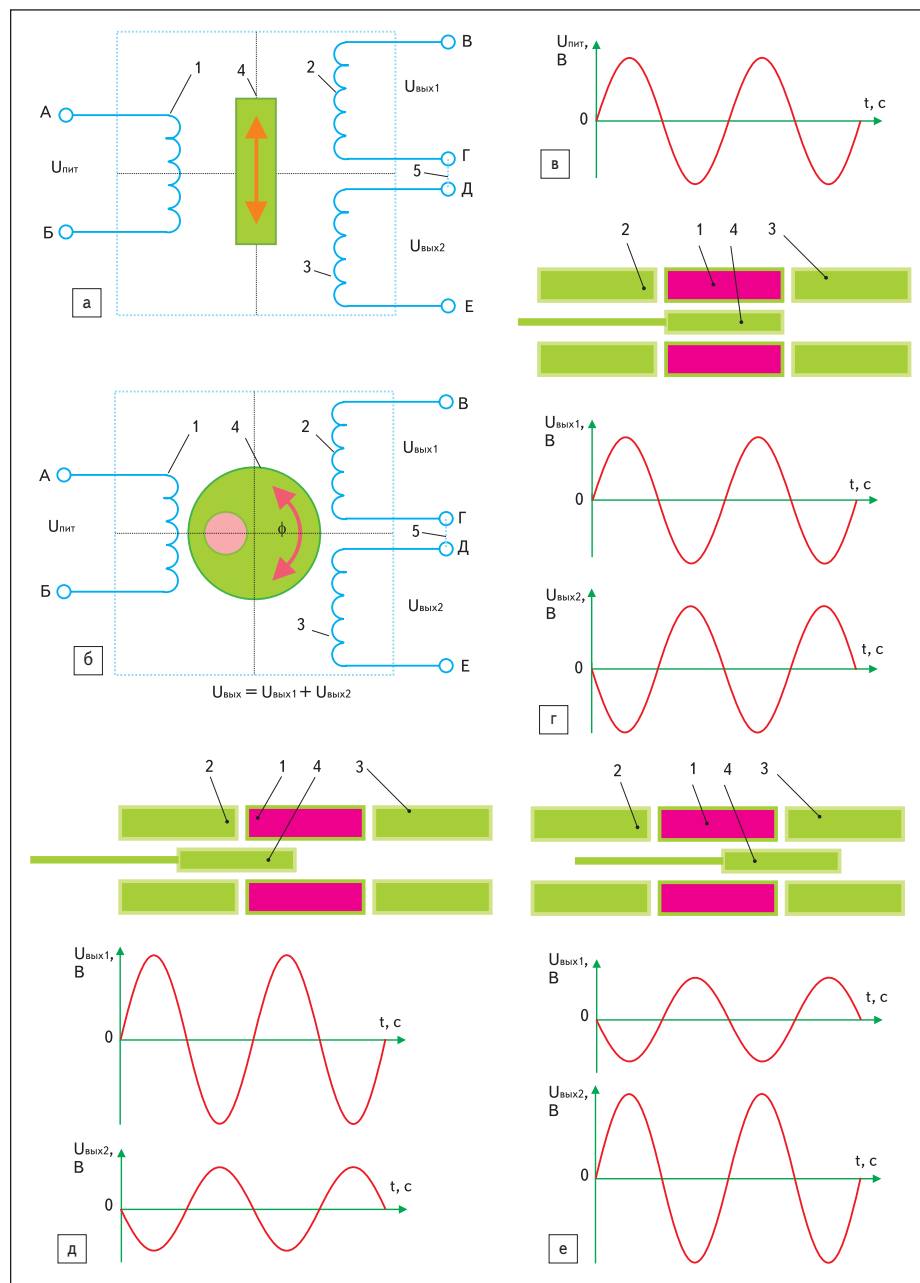


Рис. 54. Принцип действия ДТД (дифференциальных трансформаторных датчиков) переменной индуктивности: а — линейный дифференциальный трансформаторный датчик; б — вращающийся дифференциальный трансформаторный датчик; 1, 2, 3 — статический трансформатор: 1 — первичная обмотка; 2, 3 — вторичные обмотки трансформатора; 4 — ферромагнитный сердечник; 5 — дифференциальное соединение вторичных обмоток; $U_{\text{пит}}$ — напряжение питания первичной обмотки; $U_{\text{вых1}}$, $U_{\text{вых2}}$ — выходные напряжения вторичных обмоток; А...Е — контакты трансформатора. в-ж — иллюстрации работы LVDT (RVDT): 1 — первичная обмотка; 2, 3 — вторичные обмотки трансформатора; 4 — ферромагнитный сердечник; в — возбуждающее синусоидальное напряжение на первичной обмотке; г — иллюстрация симметричного положения сердечника: выходы вторичных обмоток с противоположными фазами — одинаковой амплитуды $U_{\text{вых1}}$, $U_{\text{вых2}}$; д, е — иллюстрация несимметричных положений сердечника: выходы вторичных обмоток с противоположными фазами — различной амплитуды $U_{\text{вых1}}$, $U_{\text{вых2}}$: — в случае, иллюстрируемом пунктом д, $U_{\text{вых1}} > U_{\text{вых2}}$; — в случае, иллюстрируемом пунктом е, $U_{\text{вых1}} < U_{\text{вых2}}$.

гового выхода, установка нуля и удаление смещения (демодуляция сигнала), как правило, выполняются в условиях производства.

Физические конструкции датчиков (рис. 50в-г) являются бесконтактными: при движении сердечник не контактирует

с обмотками трансформатора, которые дополнительно отделяются от сердечника (армированного узла), например, втулкой из нержавеющей стали, что обеспечивает изоляцию от внешних загрязнений — различных жидкостей и пыли. Таким образом, ДТД пред-

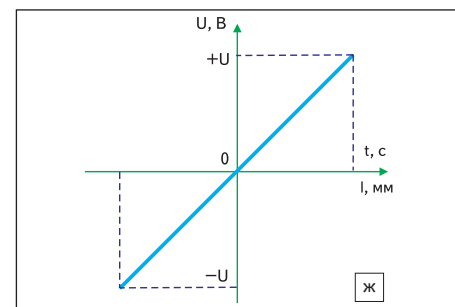


Рис. 54ж. Пример выходной характеристики LVDT (RVDT), работающих на постоянном токе

ставляет собой полностью загерметизированную систему, в которой отсутствует трение и прямой механический контакт, что увеличивает срок службы датчика. Металлические компоненты ДТД работают в широком диапазоне окружающих температур (от криогенных до порядка 500 °C), не выходят из строя под влиянием вибрации или удара и не подвержены необратимому разрушению при выходе за рабочие пределы датчика.

ДТД имеют истинно бесконечное разрешение: поскольку LVDT и RVDT работают по принципу электромагнитного объединения, они могут измерять бесконечно малые изменения в положении сердечника, ограниченные только шумами внешних усилителей и разрешением измерителей напряжения. Даже равномерное движение сердечника образует выходной сигнал.

Эти же факторы обеспечивают высокую повторяемость ДТД.

Различают ДТД, работающие на постоянном и переменном токе. ДТД переменного тока включают исполнения для высокотемпературной работы, обеспечивают лучший температурный коэффициент и рабочие диапазоны, допускают гибкое масштабирование и практически нулевое смещение.

Производители LVDT/RVDT могут снабжать их встроенными электронными схемами для питания, формирования и обработки сигнала с типичными базовыми блоками — осциллятором (генератором переменного напряжения) и демодулятором (с ФНЧ). Электронная схема питается от стандартного входного напряжения (5, 12, 24 В) и обеспечивает постоянное выходное напряжение, регулируемое, например, в пределах $0 \dots \pm 20$ В, или токовый выход 4–20 мА.

LVDT/RVDT, работающие на постоянном токе (например, LVDT серии AML/E Applied Measurements или RVDT R1380 MacroSensors — см. рис. 52 и табл. 14), обеспечивают интегрированную обработку сигнала, удобное сопряжение с интерфейсом автомобильного электронного оборудования, высокий уровень выходного сигнала, устойчивый к электромагнитным помехам и пригодный для передачи по проводам значительной длины.

В автомобильных системах LVDT и RVDT могут производить измерения внутри рабо-

тающего двигателя, цилиндров тормозов и сцепления, позволяют осуществлять обратную связь в процессе работы дроссельной заслонки, распределительного вала, коленчатого вала, клапанов и поршней.

Отличие от RVDT, и в промышленных, и в автомобильных системах используются преимущественно LVDT ввиду простоты физической конструкции и крепления (рис. 52, 53). Конструкция LVDT формируется из трех катушек, последовательно размещенных на одной прямой оси с центральной первичной обмоткой (рис. 50в). Опции крепления предполагают резьбовой монтаж сердечника на подвижной части, монтаж в конфигурации «gauge head» или на основе самоустанавливающегося подшипника (bearing mounting) [117].

LVDT подходят для задач детектирования положения автомобильной подвески (чаще применяются для контроля установки подвески на производстве), уровня, расхода и положения гидравлических и пневматических цилиндров, могут использоваться в качестве датчиков силы и температуры.

Одним из важнейших применений LVDT является их использование в качестве датчиков давления, так как детектирование линейного хода сердечника при поступательном движении поршня соответствует измерению давления в цилиндрах.

LVDT также используются на линиях сборки автомобилей для измерения проемов и щелей корпусных панелей, чтобы гарантировать точную установку оконных стекол, модулей фар заднего и переднего света. LVDT применяются и в оборудовании автоматизированного выравнивания для измерения сходимости, продольного наклона (поворотного шкворня) и развала передних колес автомобиля.

LVDT — один из исторически первых типов датчиков абсолютного положения, остающийся популярным по сей день, поскольку они способны осуществлять высоколинейные измерения (<0,25%) в широком диапазоне рабочего хода — от нескольких микрон до нескольких сантиметров и даже до 0,5–1,5 м.

Напротив, стандартные угловые преобразователи RVDT в зависимости от их конструкции предполагают измерительный диапазон порядка 120° или даже 60°, хотя и полный механический угол вращения составляет 360°. Следует отметить, что при этом RVDT обычно отличается очень узким линейным диапазоном (порядка ±40... 60° относительно нуля).

Например, RVDT D45600 Penny + Giles (см. табл. 14) поддерживает измерительный диапазон 120° (±60°), обеспечивая при этом электрический выход коэффициента К в соответствии с выражением (26) и данными, приведенными в таблице 14. При этом нели-

нейность в диапазоне угла 0...±50° составляет 1%, а в диапазоне 0...±60° — уже 2% полной шкалы. К достоинствам устройства относится высокая рабочая температура (–40... +180 °C), позволяющая использовать датчик для контроля двигателей спортивных автомобилей или в авиационных системах.

Полный механический угол датчика RVDT R1380 MacroSensors (см. табл. 14) составляет 360°, в пределах которого возможны два 100-градусных рабочих диапазона с линейностью менее ±0,25% (в полном диапазоне, локализованном в пределах 180°). Датчик обеспечивает различные выходные конфигурации: биполярный выход постоянного напряжения в диапазоне ±10 В, пропорциональный углу поворота вала в пределах 0°... ±50° или (в диапазоне углов 0–100°) униполярный аналоговый выход напряжения 0,5–4,5 В или тока 4–20 мА. Датчик R1380 допускает калибровку нуля и рабочего диапазона выходной характеристики. Данное устройство с классом защиты IP66 стоимостью от \$495 (в зависимости от объема) рекомендовано² для измерения положения в системах, где требуется высокая надежность (например, педали автопогрузчиков и тракторов).

За пределами стандартных LVDT/RVDT автомобильная продукция специального назначения (для OEM-систем) включает ДТД с цифровой компенсацией для улучшенной линейности (достигаются значения порядка 0,05%), ДТД с дистанционной электроникой и рабочим диапазоном сенсорного элемента для жестких условий окружающей среды (удары, вибрация, влажность и соляной туман).

Таким образом, к достоинствам трансформаторных датчиков относятся:

- высокая точность, стабильность, линейность, нулевая повторяемость (могут использоваться для индикации нулевого положения);
- бесконечное разрешение;
- абсолютные измерения;
- высокий уровень сигнала, устойчивость к шумам и малый выходной импеданс (полное сопротивление);
- малый гистерезис;
- малое время срабатывания, ограниченное только инерцией сердечника и схемой обработки сигнала.

Среди недостатков ДТД — значительная длина LVDT и заметное ухудшение точности при несогласовании длины рабочего хода, сложность конструкций RVDT, объясняющая их немногочисленность (см. рис. 50, 52 и 53, а также [119]), а также функциональные и конструктивные ограничения RVDT при выполнении автомобильных требований в отношении угла поворота и малого профиля³. Необходимость тщательной индивидуаль-

ной настройки LVDT и RVDT и регулировки нулевого положения (калибровки) при отсутствии у производителя наработанной технологической базы выливается в относительно высокую цену прецизионных дифференциальных трансформаторов.

Заключение

Индуктивные преобразователи LVDT и RVDT являются передовым технологическим решением для ряда узкоспециальных автомобильных задач: контроля положения и (или) перемещения в тяжелых условиях

² В настоящее время производство R1380 прекращено, но имеются в наличии коммерчески доступные образцы.

³ Исключительное требование низкого профиля характерно не для всех автомобильных систем, например, оно особенно важно для датчиков угла поворота рулевого колеса. Во многих других случаях желательна общая миниатюризация устройства, а разницей в высоте порядка нескольких миллиметров можно пренебречь.

эксплуатации, например, в спортивных автомобилях, автопогрузчиках, самосвалах или тракторах (внутри двигателя, в тормозных цилиндрах, цилиндрах сцепления), или для автомобильных испытаний (например, крэш-тестов) и технологического тестирования качества этапов сборки автомобилей.

Высоконадежные индуктивные преобразователи по-прежнему будут широко применяться в автомобильной промышленности в течение следующих нескольких лет или десятилетий. Будущие подсистемы на основе индуктивных преобразователей будут представлять собой столь же надежную комбинацию передовых инженерных и технологических мехатронных решений и «интеллектуальных», недорогих микроконтроллеров, что допускает их использование для решения множества типичных автомобильных задач контроля положения.

В то же время технологический уровень индуктивных преобразователей и технологий непрерывно повышается и на прежнем или более низком ценовом уровне представлен сегодня другими новейшими технологиями, более технологичными и менее материалоемкими конструкциями датчиков, созданных специально для автоэлектроники. Их обсуждение будет продолжено в следующей части настоящего цикла. ■

Литература

117. Nyce D. S. The LVDT: A Simple and Accurate Position Sensor // Sensors Magazine. 2005. Aug. <http://www.sensorsmag.com/articles/0805/21/main.shtml>.
118. Scott D. Welsby. Capacitive and Inductive Noncontact Measurement // Sensors Magazine. 2003. March. <http://www.sensorsmag.com/articles/0303/capacitive/main.shtml>.
119. Rotary variable differential transformer. US Patent 6 563 412. Оpubл. 13.05.2003. Harold Beck and Sons, Inc.