

## ПАВ-ДАТЧИКИ ВЯЗКОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКИХ СРЕД КОМПАНИИ VECTRON INTERNATIONAL

Вязкость жидкой среды, т.е. способность оказывать сопротивление передвижению ее частиц, характеризует текучесть и подвижность жидкости. Чтобы повысить качество выполнения технологических операций в фармацевтическом, лакокрасочном, керамическом производствах, качество обработки сажи или пульпы, изготовления изоляционных и резиновых покрытий, операций окрашивания и печати, контроля состояния движущихся в масляной среде металлических деталей, стабилизировать работу двигателей и турбин, необходимо оперативно измерять вязкость используемых жидких сред. Выполнение этой операции – сложная техническая задача, поскольку диапазон значений вязкости и температуры жидкости широк, а агрессивный характер среды, ее сложный химический состав, абразивные свойства и другие факторы зачастую осложняют этот процесс. Для традиционных датчиков серьезной проблемой оказывается и бесконтактное измерение температуры жидкой среды. Однако эти задачи могут успешно решать устройства высокотехнологичной электроники, в которых используется распространение акустических волн в твердом теле. Новые изделия на этой основе, созданные в корпорации Vectron International, позволяют существенно повысить качество продукции и технологических операций, требующих измерения вязкости жидких сред.

### КОРПОРАЦИЯ VECTRON INTERNATIONAL

Международная корпорация Vectron International свыше 50 лет разрабатывает и производит частотные фильтры и источники колебаний с высокой стабильностью частоты на основе поверхностных и объемных акустических волн, распространяющихся в пьезокварцевых кристаллах [1]. В 2008 году валовой объем продаж продукции корпорации составил ~250 млн. долл. В шести ее филиалах работают свыше 1200 человек.

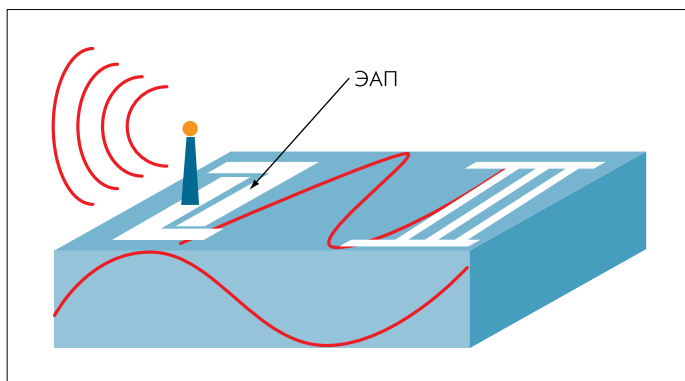
Л.Белов

Vectron International входит в состав крупного международного холдинга Dover Company с годовым оборотом свыше 7 млрд. долл. Холдинг координирует деятельность более 50 компаний различного профиля, среди них – Dow-Key Microwave, K&L Microwave, Dielectric Laboratories, Pole Zero, Voltronics и другие. Автоматизированный технологический процесс изготовления изделий корпорации Vectron предусматривает применение высокоточного измерительного оборудования для многократного контроля выпускаемых изделий. Поэтому продукция Vectron соответствует сертификатам качества стандартов ISO 9001, ISO 14000, QS 9000, TS 16949.

Технологию датчиков физических параметров жидкостей и газов, основанных на распространении поверхностных (или объемных) акустических волн в твердом теле, развивает отделение SenGenuity [2, 3] корпорации Vectron International. Датчики температуры, давления газовой среды, уровня вибраций, влажности, вязкости, концентрации определенных химических элементов и других параметров жидкости преобразуют контролируемую физическую величину окружающей среды в изменение затухания сигналов или частоты автоколебаний генератора с акустоэлектронной линией задержки. При этом задержка линии может быть измерена с очень малой погрешностью. Объем мирового рынка датчиков сейчас оценивается в 50 млрд. долл., и отделение SenGenuity претендует на статус лидера в секторе рынка акустоэлектронных компонентов.

### ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКИХ СРЕД

Задача измерения параметров вязких жидкостей (масла двигателей и турбин, нефти, пульпы, красок, жидкостей в фармацевтическом, керамическом, изолирующем производствах и др.) – сложная и противоречивая. Так, время единичного измерения вручную с помощью профессионального вискозиметра ротационного, капиллярного или ультразвукового типа достаточно велико [4]. Традиционные термодатчики нуждаются в регулярной калибровке потребителем и не могут устанавливаться на движущихся в жидкой среде металлических деталях из-за необходимости подключать провода для питания датчика и съема информации. Нередко правильному функционированию датчиков мешает высокий уровень вибраций. Серьезной проблемой является одно



**Рис. 1. Схема бесконтактного ПАВ-датчика**

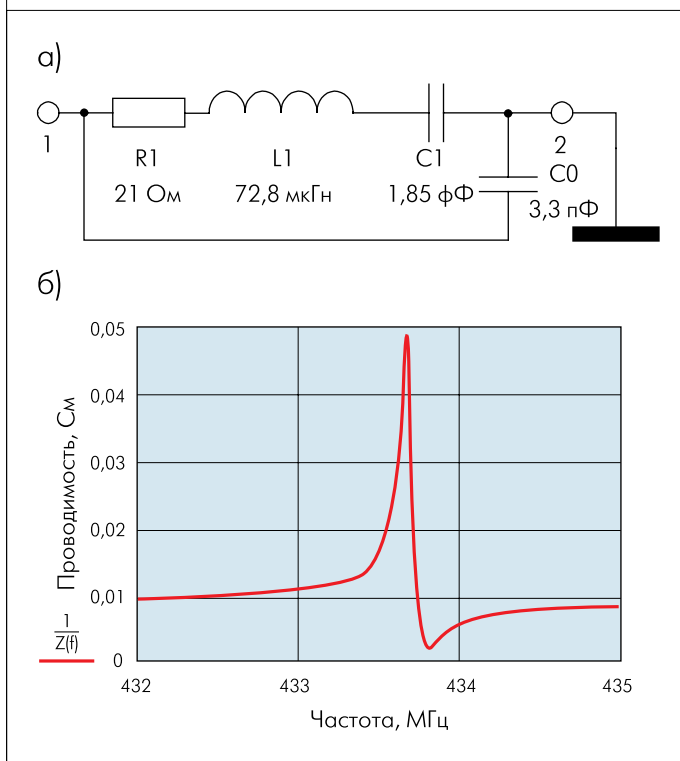
из важных приложений измерителей вязкости – контроль состояния чернил в машинах глубокой печати, без которого невозможно обеспечить высокое качество процесса. Новые датчики корпорации Vectron International, появившиеся на рынке, предоставляют большие возможности для решения указанных задач.

**Вязкость** жидкостей характеризует коэффициент, связывающий силу внутреннего трения и градиент скорости перемещения жидкости. Динамическая вязкость измеряется в пуазах (poise – P):  $1 \text{ П} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с} = 0,1 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ , кинематическая вязкость, нормирующая динамическую вязкость к плотности вещества в  $1 \text{ г}/\text{см}^3$ , – в стоксах (stoks – St):  $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}$ . Разработчики отделения SenGenuity калибруют вязкость датчиков в единицах акустической вязкости (Acoustic Viscosity – AV):  $1 \text{ AV} = 0,01 \text{ П}\cdot\text{г}/\text{см}^3$ .

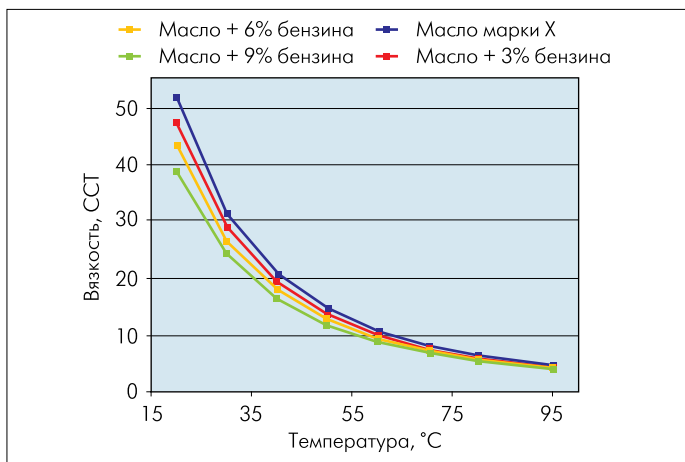
При измерении параметров вязкой жидкости датчиком на основе поверхностных акустических волн (ПАВ) на образец пьезокварца наносится слой контролируемой жидкости. Электроакустическим преобразователем (ЭАП) в пьезокварце возбуждается поверхностная или объемная акустическая волна (рис.1), которая распространяется между ЭАП и отражающей структурой. При этом возникает стоячая волна, что эквивалентно формированию электрической цепи, резонансная частота которой обратно пропорциональна удвоенному времени задержки акустической волны при распространении между ЭАП и отражающей структурой. Типичная эквивалентная электрическая схема ПАВ-датчика с одним пор-

том содержит цепи с последовательным и параллельным резонансами (рис.2а). Частотная характеристика проводимости такого датчика имеет вид резонансной кривой высокодобротного контура (рис.2б). Резонансная частота и максимальное значение проводимости зависят от температуры жидкости, ее вязкости и состава. По значению вязкости масла можно, например, оценить концентрацию растворенного в нем бензина (рис.3) и, тем самым, контролировать качество смазки агрегатов двигателей и турбин.

В качестве чувствительной поверхности в датчиках корпорации Vectron используются прочные алмазоподобные материалы, специально созданные по запатентованной технологии, что позволяет контролировать параметры жидкостей с абразивными свойствами или жидкостей, в состав которых входят химически агрессивные компоненты.



**Рис.2. Эквивалентная электрическая схема ПАВ-датчика TFSS433D (а) и частотная характеристика его проводимости (б)**



**Рис.3. Влияние температуры и концентрации бензина, растворенного в смазочном масле, на его вязкость**

Датчики на ПАВ выполняются в виде миниатюрных пленок или таблеток и применяются в различных устройствах – от электронных и промышленных систем до биомедицинских приборов. К их достоинствам относятся:

- простая технология установки;
- получение результатов измерений в режиме технологического процесса;
- отсутствие движущихся частей;
- полное погружение в контролируемую среду;
- слабая чувствительность к вибрациям и к движущимся потокам в контролируемой среде;
- отсутствие операций калибровки и обслуживания у потребителя;
- малые размеры и возможность установки в разных точках агрегата;
- возможность измерения широкого диапазона значений контролируемой величины;
- устойчивость к коррозии;
- возможность работы в агрессивных средах с температурой до 250°C;
- большой срок службы;
- низкая цена и коммерческая доступность.

### Бесконтактные датчики температуры

В типовой конструкции устройства беспроводного измерения один или несколько датчиков соединяются с антенной



**Рис.4. Беспроводной датчик температуры TFSS433D**

A1, находящейся внутри контролируемого объема. Вне этого объема размещается модуль обработки и индикации результатов измерений. В состав модуля входит автогенератор с антенной A2, частота генерации которого благодаря электромагнитной связи между антеннами A1 и A2 близка к резонансной частоте датчика. Энергия, наводимая в антенне датчика A1, преобразуется в акустическую волну, которая распространяется вдоль чувствительной поверхности датчика, отражается от конца линии, возвращается к преобразователю и переизлучается модулю обработки. Зависимость коэффициента отражения электрической волны от частоты со стороны порта связи с внешней цепью (контакты 1–2 на рис.2а) имеет резонансный характер. Если температура окружающей среды и акустопровода изменяется, то изменение параметров распространения волны приводит к изменению резонансной частоты и максимального значения коэффициента передачи. Сигнальный процессор, входящий в состав модуля обработки, формирует значение температуры. Процесс измерения – пассивный и беспроводной. Разумеется, когда необходимости в беспроводной связи между датчиком и модулем обработки нет, датчик можно использовать в качестве стабилизирующего резонатора в составе простой автоколебательной схемы.

На рис.4 представлен датчик беспроводного измерения температуры корпорации Vectron TFSS433D. К его достоинствам относятся малое время отсчета частоты; исключительно низкий уровень мощности, затрачиваемой на возбуждение акустической волны; высокие значения чувствительности и разрешающей способности; повторяемость результатов измерений. Такого рода датчики находят разнообразное применение: при лазерной печати, в устройствах вентиляции и кондиционирования воздуха, приборах транспортных средств, медицинской аппаратуре и др.

Температурный коэффициент частоты (ТКЧ) TFSS433D составляет 7028 Гц/°C, диапазон рабочих температур – 0...120°C, погрешность измерения – ±3°C. Шкала измеряемых значений линейна во всем диапазоне температур, максимальные собственные потери энергии в датчике составляют 2,5 дБ, входной импеданс – 50 Ом. Рабочая частота радиосигнала равна ~433,92 МГц (европейская полоса ISM) и не требует лицензирования. Ударостойкость датчика (до 500 g) соответствует спецификации DIN IEC 68 T2-27, вибрационная стойкость (10–500 Гц со скоростью перестройки 1 октава в минуту с ускорением до 5 g) – стандарту DIN IEC 68 T2-6, температурная стабильность (10 термоциклов в диапазоне от 0 до 120°C в течение 30 мин) – стандарту DIN IEC 68 Part 2 – 14 Test N. По желанию заказчика датчики могут монтироваться в корпуса другого размера и с другим числом выводов.

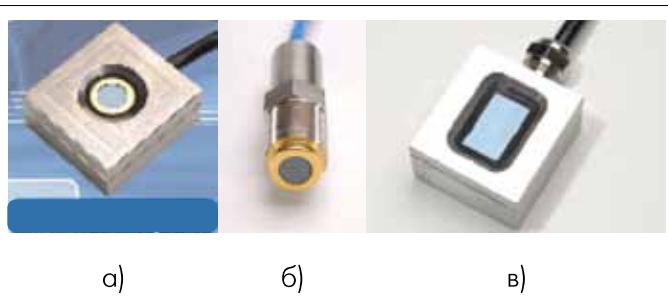
В начале 2009 года корпорация Vectron планировала представить демонстрационную конструкцию, содержащую четыре беспроводных датчика и антенну.



### Датчики вязкости жидкости

Датчики низких и высоких значений вязкости жидкости (Low Shear Square – LSS и High Shear Square – HSS) выполняются в прямоугольном корпусе (рис.5). LSS-датчик выпускается также в виде болта (Low Shear Bolt – LSB) с резьбой 1/2" (близкой к метрической M14).

Модели **ViSmart** классов LSS и LSB работают на частоте 5 МГц. Они не имеют движущихся частей; их чувствительная поверхность выполнена из высокопрочного материала. Результат измерений не зависит от ориентации датчика и от вибраций сосуда с контролируемой жидкостью. Для измерения требуется не более 100 мкл жидкости. Потребителю не нужно калибровать датчик. Для регистрации результата измерений в цифровом виде или использования аналогового выхода датчики модели ViSmart через порт USB можно соединять с ноутбуком. Калиброванный диапазон измеряемых значений вязкости датчиков составляет 1–400 АВ; погрешность измерения, не превышающая 10%, пропорциональна измеряемому значению, а не максимальному номиналу шкалы. Внешнее давление составляет 0–4,14 бар; периодичность повторения измерений – не чаще 1 отсчета в секунду (программируется пользователем, по умолчанию периодичность равна 1 отсчету в 30 с). Для питания датчика используется источник постоянного тока на напряжение 5–10 В, при этом потребляемый ток не превышает 35 мА, потребляемая мощность – 175 мВт. Диапазон рабочих температур составляет -15...125°C, температур



**Рис.5. Датчики вязкости LSS (а), LSB (б), HSS (в)**

хранения – -40...150°C. Диаметр датчика LSB равен 25,4 мм, длина – 86,4 мм, масса – 113 г, размер соединителя с цифровым интерфейсом – 53,8×52,6×17,0 мм, масса – 230 г.

Датчик модели ViSmart класса HSS работает на частоте 160 МГц. Его калиброванный диапазон вязкости составляет 1–200 АВ, диапазон измеряемых значений – 1–500 АВ. Погрешность измерения пропорциональна измеряемому значению и не превышает 10%. Измерения проводятся при атмосферном давлении 0 бар; периодичность повторения измерений – не чаще 1 отсчета в секунду (программируется пользователем, по умолчанию периодичность составляет 1 отсчет в 30 с). Напряжение питания 5–10 В, потребляемый ток – не более 35 мА, потребляемая мощность – 175 мВт при напряжении питания 5 В. Диапазон рабочих температур 0...85°C, диапазон температур хранения -40...85°C. Габариты датчика класса HSS модели ViSmart с ана-



**Рис.6. Модули связи с датчиками eCup (а), FluidTrackr (б), VisConnect (в)**

логовым выходом равны 12,7×31,7×29,2 мм, соединителя с цифровым интерфейсом – 53,8×52,8×17,0 мм. Предназначен для машин, формирующих резиноподобную изоляцию.

Vectron также выпускает модель ViSmart с расширенным диапазоном измеряемой вязкости – 1000–10 000 АВ; остальные физические, электрические и механические характеристики те же, что и у базовой модели.

Разработанные и выпускаемые на мировой рынок новые датчики вязкости подвергались компанией SenGenuity многочисленным испытаниям и тестированию по различным методикам и стандартам. Результаты проведенных испытаний на стойкость датчиков при работе в течение восьми дней в агрессивной среде (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, NaOH, раствор ацетона в полиуретане, раствор акриловой резины, раствор метила в краске и этила в бензине, моторные масла разного состава), а также в перспективном экологически чистом биодизельном топливе [5] и т.п. можно найти на сайтах корпорации Vectron и компании SenGenuity [2, 3]. Данные испытаний на воспроизводимость результатов, на влияние взвесей частиц разного размера в составе жидкостей, сопоставление полученных результатов с данными лабораторных вискозиметров говорят о высокой достоверности и надежности разработанных датчиков.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для связи с ПАВ-датчиками и обработки результатов измерений используются цифровые блоки моделей eCup, FluidTrackr и VisConnect (рис.6).

**eCup** – ручной модуль для сопряжения с датчиками и отсчета измеряемых параметров жидкости. У него два порта связи с датчиками. В модуле предусмотрено немедленное автоматическое согласование с ЖК-дисплеем с диагональю 9,6 см, который работает по принципу "включи и играй" (Plug-to-Play). Встроенная литий-ионная аккумуляторная батарея обеспечивает четыре часа непрерывной работы. В комплект модуля входят адаптер подзарядки от сети переменного тока; встроенные флеш-память, интерфейс связи с компьютером по USB-порту, с информационной сетью по интерфейсу Ethernet, с клавиатурой по порту PS2. Кроме акустoeлектронных датчиков температуры и вязкости к модулю могут быть подключены температурные датчики на терморезисторах (RTD), датчики давления, кислотности pH. Диапазон рабочих температур модуля 0...60°C. Поставляется с защитным кофром. Масса модуля 1,27 кг.

**FluidTrackr** – переносной модуль цифровой индикации результатов измерений. Выполнен на основе технологии Toughbook U1; имеет цветной ЖК-дисплей с диагональю 14,2 см, память емкостью 16 Гбайт, быстродействующее ОЗУ объемом 1024 Мбайт. Встроен интерфейс USB; возможна беспроводная связь с компьютером, работающим с ОС Windows XP. Аккумуляторная батарея обеспечивает непрерывную работу в течение 9 ч.

**VisConnect** – модуль связи с датчиками вязкости. С выхода модуля снимается либо ток (4–20 мА), либо напряжение (0,5–4,5 В). В модуле имеются два канала измерения вязкости и температуры; последовательный интерфейс связи с компьютером RS 232 при скорости передачи 9600 Кбод. Питание от сети переменного тока 110–240 В или от источника постоянного тока на напряжение 9–24 В с разбросом не более 100 мВ. Потребляемый ток составляет 100 мА. Предусмотрены гальваническая развязка по выходной цепи, встроенная защита от перенапряжения, от короткого замыкания, от неправильной полярности источника питания, светодиодная индикация рабочего режима. Можно выбрать опцию с цифровым или аналоговым выходом, с последовательным интерфейсом RS 232. Диапазон рабочих температур 0...70°C. Модуль сопрягается с вычислительными платформами VisConnect, eCup, PC-ViscNet and ViscNet.

На рынке прикладной электроники появляются изделия, основанные на новых принципах построения микродатчиков – акустoeлектронных, вибрационных, ультразвуковых, инфракрасных термографических, трибологических (tribology). Можно говорить о революционном внедрении высоких технологий в промышленные устройства фармацевтического, химического, керамического производств, в средства смазки, окрашивания, нанесения изоляции, микропечати, стабилизации режимов работы автомобильных двигателей и генераторных установок и др.

Современные новейшие ПАВ-датчики можно приобрести в ООО "Радиокомп" [6], которое является официальным представителем продукции корпорации Vectron International на российском рынке.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Л. Кварцевые генераторы и фильтры компании Vectron International.— ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, №2.
2. www.visensors.com
3. www.sengenuity.com
4. Ballantine D.S., White R.M., Martin S.J, Ricco et al. Acoustic Wave Sensors: Theory, Design, and Pysicochemical Applications, Academic Press, 1997.
5. Naoko E., Feng G., Chen T. and Poon C. (University of British Columbia, Vancouver, Canada). Monitoring biodiesel production (transesterification) using in situ viscometer. Chemical Engineering Journal, Issue 138 (2008).
6. www.radiocomp.net. РАДИОКОМП – радиокомпоненты мировых производителей.