

## РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА С ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА СИЛЫ

П.А. Акулов (ФГБОУ ВО «БГУ»), А.Д. Сырых (ООО «КОНСТРУКТОР»)

Предложен модуль обработки сигнала с тензодатчика. Описана структура и алгоритм работы модуля. Применение данного устройства позволит увеличить точность преобразования выходного сигнала, снизить влияние помех и термо-ЭДС на результаты измерений при высокоскоростной передаче данных промышленному контроллеру.

Ключевые слова: тензодатчик, сила, модуль обработки, схема подключения,  $\text{sin}3\text{-}$ фильтр.

**Введение**

Тензометрические датчики (тензодатчики) получили широкое распространение при измерении величины прикладываемой силы, давления, веса, деформации и прочих физических характеристик.

Работа тензометрических датчиков основана на принципе изменения электрического сопротивления тензорезисторов при деформации под действием измеряемой физической величины. При растяжении проводящих элементов тензометрического резистора увеличивается их длина и уменьшается поперечное сечение, что увеличивает сопротивление тензометрического резистора, при сжатии — наоборот [1].

Для обеспечения стабильности и устранения влияния температуры при проведении измерений, как правило, используют соединение датчиков по мостовой схеме [2, 3] (рис. 1). При этом два резистора (например, R1-R3) моста работают на сжатие, а два других (R2-R4) — на растяжение.

Питающее напряжение ( $U_{\text{exc}}$ ) приложено к диагонали А-В тензометрического датчика, а сигнал рассогласования моста снимается с диагонали С-Д датчика. Приложенное усилие к датчику приводит к рассогласованию параметров тензометрических элементов моста и к изменению выходного сигнала ( $U_x$ ).

Цель работы — повышение точности обработки выходного сигнала тензодатчика с одновременным снижением влияния внешних факторов на результаты измерений за счет применения собственной схемы и алгоритма работы модуля.

**Постановка задачи**

Сложность обработки сигналов тензометрического датчика объясняется малой величиной полезного сигнала в условиях потенциального наличия помех значительной величины, так как длина проводов, используемых для подключения тензометрического датчика, может достигать десятков метров. Например, если типовая чувствительность серийных датчиков находится в диапазоне 0,9...2 мВ/В, то выходной сигнал датчика ( $U_x$ ) при номинальной нагрузке и питающем напряжении 10 В не превышает величины в диапазоне 9...20 мВ [4].

Приведенная на рис. 1 схема подключения тензометрического датчика является идеализированной, так как не учитывает целый ряд факторов, влияющих на получение корректного результата. К числу таких факторов следует отнести:

1) сопротивление в проводах, используемых для подачи питающего напряжения ( $U_{\text{exc}}$ ) тензометрического датчика;

2) контактную разность потенциалов, возникающую при контакте разнородных проводников при одинаковой температуре в местах пайки и т. д.;

3) термо-ЭДС, возникающая при контакте проводников, находящихся при различной температуре (эффект Зеебека);

4) наводки от питающей сети переменного тока на частотах, кратных частоте питающей сети.

Основной задачей работы является минимизация влияния этих факторов на результаты измерения.

**Решение задачи**

Для устранения влияния сопротивления проводов, используемых для подачи питания на тензометрический датчик, используется шестипроводная схема подключения, представленная на следующем рис. 2.

При такой схеме подключения питающее напряжение ( $U_{\text{exc}}$ ) поступает на плечо А-В моста по проводникам, в цепи которых включены два резистора ( $R_a$  и  $R_b$  соответственно), величина которых равна сопротивлению подводящих проводов. При этом реальное значение величины питающего напряжения моста снимается с отдельных проводов ( $U_{\text{ref}}$ ), которое используется для вычисления (коррекции) сигнала разбалансировки моста. С учетом того, что цепи обработки сигнала  $U_{\text{ref}}$  обладают высоким входным сопротивлением, сопротивлением в соединительных проводах для передачи этого сигнала можно пренебречь.

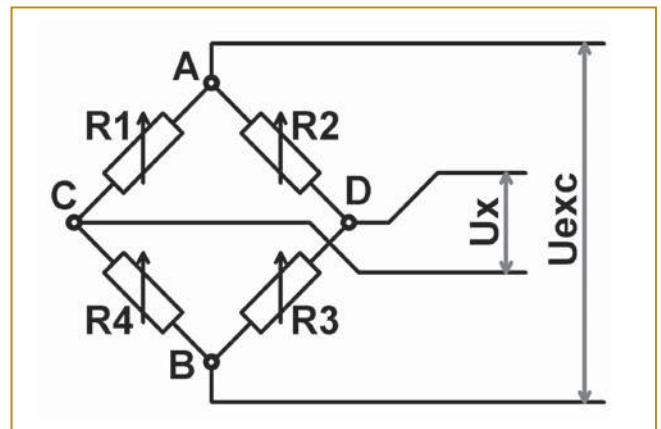


Рис. 1. Мостовая схема подключения тензометрических датчиков силы

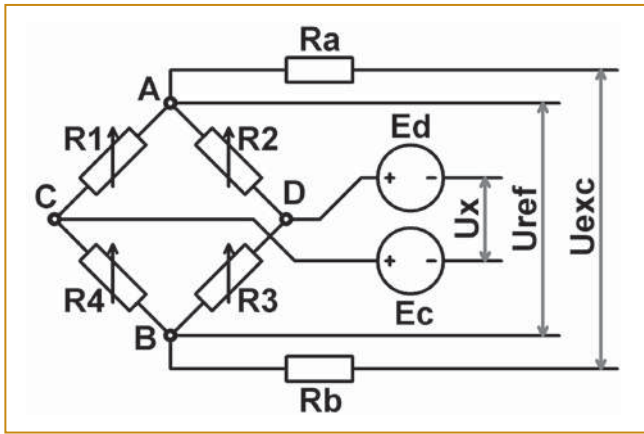


Рис. 2. Шестипроводная схема подключения тензометрического датчика

Схематично влияние контактной разности потенциалов и термо-ЭДС на выходной сигнал датчика может быть представлено двумя источниками напряжения ( $E_c$  и  $E_d$ ), включенными последовательно с выходным сигналом датчика. Знак этих источников напряжения может быть произвольным, а величина сигнала — сопоставимой с полезным сигналом тензометрического датчика. Для устранения данных факторов в схеме обработки сигналов тензометрических датчиков предусмотрено знакопеременное питание. При этом используется тот факт, что при смене знака питающего напряжения полезный сигнал рассогласования моста также меняет знак, в то время как сигнал помехи, связанный с контактной разностью потенциалов и эффектом Зеебека, не меняет своего знака. В этом случае, проведение двух последовательных измерений выходного сигнала датчика при разном знаке питающего напряжения с последующим усреднением величины полезного сигнала, приводит к взаимному вычитанию из результатов величины сигналов контактной разности потенциалов и термо-ЭДС.

Формирование знакопеременного сигнала питания тензометрического датчика, как правило, осуществляется с помощью мостового инвертора, который обеспечивает с помощью ключевых элементов попеременное формирование на выходе (OUT A и OUT B) знакопеременного питающего сигнала в зависимости от уровня сигнала управления INPUT. При смене уровня сигнала управления с «низкого» на «высокий» мостовой инвертор меняет полярность выходного сигнала и потенциалы на выходе (OUT A и OUT B) меняются местами.

Схемотехнически мостовой инвертор состоит из четырех ключевых элементов, соединенных так, как это представлено на рис. 3.

При низком уровне управляющего сигнала INPUT, ключевой элемент V1 «открыт», то есть находится в проводящем состоянии, в то время как ключевой элемент V2 «закрыт» — находится в непроводящем состоянии. С учетом инверсии, ключевой

элемент V3 — «открыт», а элемент V4 — «закрыт». Соответственно потенциал выходного сигнала OUT A с точностью до падения напряжения на внутреннем сопротивлении ключевого элемента в «открытом» состоянии оказывается равным потенциалу питающего напряжения VCC, в то время как потенциал выходного сигнала OUT B с высокой точностью приближен к потенциалу «земли» (GND). При смене уровня входного сигнала INPUT состояния ключевых элементов изменяются на противоположное, что приводит к инверсии выходных сигналов, то есть потенциал выходного сигнала OUT A равен потенциалу «земли» (GND), а потенциал сигнала OUT B — потенциалу питающего напряжения (VCC).

Таким образом, алгоритм обработки сигнала тензометрического датчика при знакопеременном питании состоит в следующем:

- при «низком» уровне входного сигнала на входе INPUT на тензометрический датчик подается питающее напряжение одной полярности (OUT A = VCC, OUT B = GND), то есть  $U_{exc} = VCC - GND$ ;
- осуществляется измерение сигнала питающего напряжения моста  $U_{ref}$  и полезного сигнала (сигнала разбалансировки тензометрического моста)  $U_x \pm E_c \pm E_d$ , после чего вычисляется соотношение:  $(U_x \pm E_c \pm E_d) / U_{ref}$ ;
- уровень входного сигнала мостового инвертора INPUT меняется на «высокий», что приводит к смене полярности питания тензометрического датчика (OUT A = GND, OUT B = VCC), то есть  $U_{exc} = GND - VCC$ ;
- осуществляется измерение сигнала питающего напряжения моста  $U_{ref}$  и полезного сигнала (сигнала разбалансировки тензометрического моста)  $U_x \pm E_c \pm E_d$  (с учетом того, что  $E_c$  и  $E_d$  за время между измерениями не меняют ни знака, ни величины) и соотношение  $(-U_x \pm E_c \pm E_d) / (-U_{ref})$ ;
- результаты двух последовательных измерений вычитаются, что приводит к устранению влияния

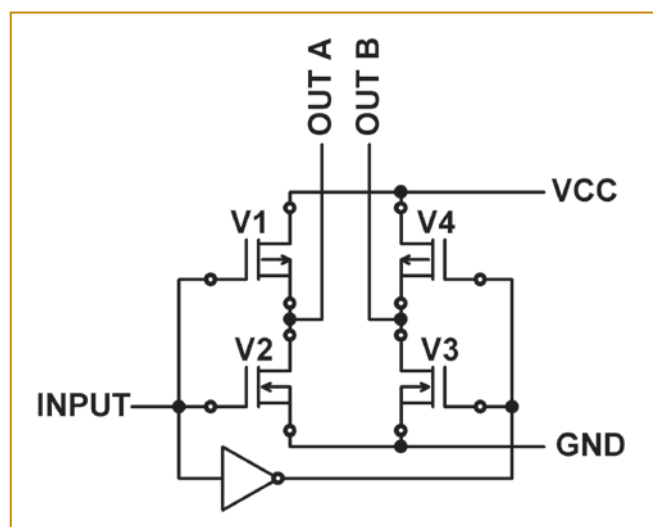


Рис. 3. Схема мостового инвертора

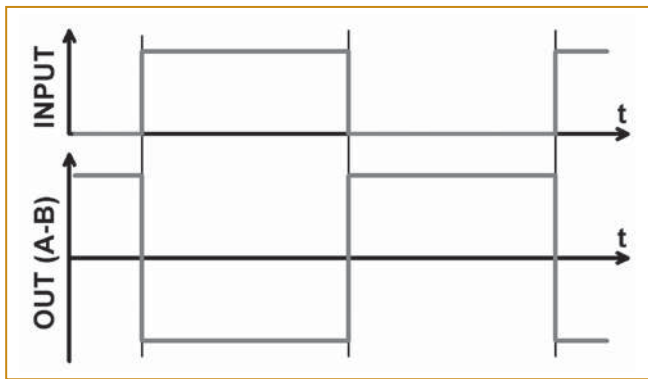


Рис. 4. Диаграмма работы мостового инвертора

сигналов  $E_c$  и  $E_d$  из результатов измерений, то есть в результате остается только соотношение  $U_x/U_{ref}$ ;

- снова происходит смена полярности питающего напряжения тензометрического датчика путем смены уровня сигнала INPUT, цикл измерений повторяется, при этом результаты измерений предыдущего цикла обратного включения питающего напряжения используются для следующих вычислений.

Помехи, связанные с наводками от питающей сети переменного тока, подавляются с помощью цифровой фильтрации результатов аналого-цифрового сигма-дельта преобразования [5]. При этом, как правило, речь идет об использовании не одного типа фильтра, а их комбинации с синхронизацией между собой, работой сигма-дельта аналого-цифрового модулятора и работой мостового инвертора смены полярности питания тензометрического датчика.

Так, применение так называемого sinc3-фильтра позволяет эффективно подавлять помехи на выбранных частотах, например, на частоте питающей сети и кратных ей частотах (50, 100, 150 Гц и т.д.). Типичная частотная характеристика sinc-фильтра разных порядков представлена на рис. 5, где по оси X отложена нормированная частота.

Как следует из рис. 5, данный тип фильтра позволяет эффективно подавлять помехи на частотах, кратных частоте питающей сети 50 или 60 Гц.

Использование рекурсивных фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтров),

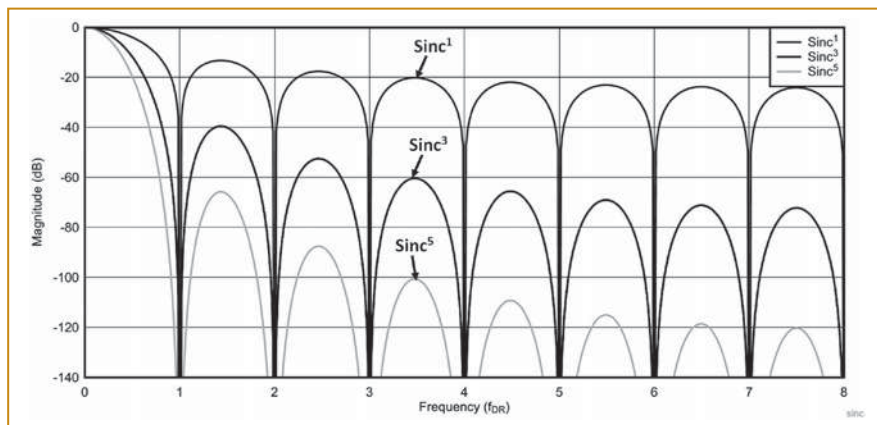


Рис. 5. Частотная характеристика sinc-фильтра

даже простейшего фильтра «скользящего среднего», позволяет фильтровать короткие всплески обрабатываемого сигнала, возникающие от рядом стоящего оборудования в моменты его включения/выключения и коммутации цепей большой мощности.

Одновременно с этим совместная синхронизированная работа фильтров позволяет зафиксировать ступенчатое (скачкообразное) изменение измеряемого сигнала и реализовать сброс «накопленных» результатов КИХ-фильтра для ускоренной обработки вновь получаемых данных.

Для реализации всех перечисленных функций по обработке сигналов тензометрических датчиков силы компания Analog Devices разработала специализированный контроллер типа AD7730 (L) [6], который включает:

- полностью дифференциальные цепи обработки входного ( $U_x$ ) и опорного ( $U_{ref}$ ) сигналов;
- программно-управляемый коэффициент усиления входного сигнала, интегрированный с аналоговым модулятором дельта-сигма преобразователя;
- 24-битный аналого-цифровой преобразователь по missing codes;
- встроенный программируемый sinc3-фильтр, синхронизированный с программируемым КИХ-фильтром;
- программируемый детектор скачкообразного изменения входного сигнала с возможностью сброса ранее накопленных данных в КИХ-фильтре;
- программное управление режимом питания датчика как с использованием однополярного питания, так и внутренняя схема генерации управляющих сигналов для инвертора напряжения питания тензометрического датчика при использовании знакопеременного питания, синхронизированная с работой дельта-сигма преобразователя [5] и цепями фильтрации;
- взаимодействие с микропроцессором осуществляется по высокоскоростной SPI-шине со скоростью до 4 Мбит/с.

Численное моделирование работы цифровой фильтрации дает возможность путем изменения программируемых коэффициентов достичь подавления помех на частотах, кратных частоте питающей сети.

Максимальные результаты по подавлению сигналов на кратных частотах питающей сети достигаются при двух настройках фильтра, данные о которых приведены в таблице.

Второй вариант настроек позволяет достичь высокой скорости обработки при практически отсутствующем подавлении помех на частоте 200 Гц, однако и в спектре помех их величина (4-ая гармоника) не должна быть значительной.

При этом вклад каждого из фильтров и результирующая



Таблица. Результаты по подавлению сигналов на кратных частотах питающей сети

Вариант настройки	Скорость обработки (SPS)	Подавление (dB) на частоте			
		50 Гц	100 Гц	150 Гц	200 Гц
1	66,66	-304	-322	-327	-985
2	200	-307	-315	-304	-5

частотная характеристика представлена на рис. 6 (для 1-го варианта настройки).

Общее управление модулем реализовано на микропроцессоре серии ARM Cortex-M0 типа STM32F042 (U3) производства STMicroelectronics. Обработка сигнала тензометрического датчика реализована на специализированном контроллере AD7730 (U2) [6], которая взаимодействует с процессором по шине SPI, в качестве инвертора питающего напряжения тензометрического датчика — интегральная микросхема типа TC4427 (U1) производства Microchip Technology. Разъем J1 предназначен для подключения тензометрического датчика. Энергонезависимая память (EEPROM), используемая для хранения переменных, реализована на интегральной микросхеме M24C08-W (U4) производства STMicroelectronics, взаимодействие с которым осуществляется по I2C-шине.

Стандартный обмен информацией (получение команд управления и передача результатов измерений) реализован по шине USB в режиме Full Speed со скоростью

до 12 Мбит/с. Подключение к USB-хосту осуществляется с помощью разъема J3. Питающее напряжение 5 В, необходимое для работы модуля, также поступает по шине USB от внешнего USB-хоста. Это напряжение использовано для питания аналоговой части модуля обработки сигналов тензометрического датчика. Питание цифровой части AD7730 [6] (U2) и микропроцессора U3 величиной 3,3 В формируется интегральной микросхемой линейного стабилизатора типа MC33275D-3.3R2 (U7) производства STMicroelectronics.

Если в автоматизированной системе используется шаговый двигатель [7, 8], которым необходимо управлять по командам протокола STEP-DIR-Enable, поступающим от модуля обработки сигнала с тензодатчика, то в этом случае предусмотрены оптоизолированные выходы, реализованные с помощью интегральной микросхемы U6 типа ADuM1401, а разъем J2 используется для подключения концевых датчиков положения. Также в разработанном модуле имеется оптоизолированный дополнительный канал ввода/вывода по последовательному протоколу UART, реализованный на интегральной микросхеме ADuM1201 (U5) и разъеме J4.

После включения модуля микропроцессор U3 считывает значения переменных из энергонезависимой памяти (EEPROM) U4 и осуществляет начальную установку (конфигурацию) режимов работы и значений параметров системы фильтрации контроллера U2. После успешного завершения начальной инициализации, по командам микропроцессора U3 контроллер U2 переключается в режим «поточного» преобразования сигнала тензометрического датчика. После каждого цикла аналого-цифрового преобразования данные, обработанные контроллером U2, считываются микропроцессором U3 и после незначительной обработки передаются внешнему USB-хосту для последующей обработки и индикации результатов измерений. В режиме «поточного» преобразования аналого-цифровое преобразование осуществляется циклически, без необходимости передачи каких-либо команд от микропроцессора. После окончания каждого цикла преобразования контроллер U2 «опускает» уровень сигнала на шине ADC\_RDY, что фиксируется микропроцессором U3, генерируется программное прерывание, по которому микропроцессор инициирует цикл считывания результата обработки тензометрического датчика.

Передача данных о величине сигнала тензометрического датчика выдается внешним потребителям в виде 5-байтной посылки, четыре старших байта — данные

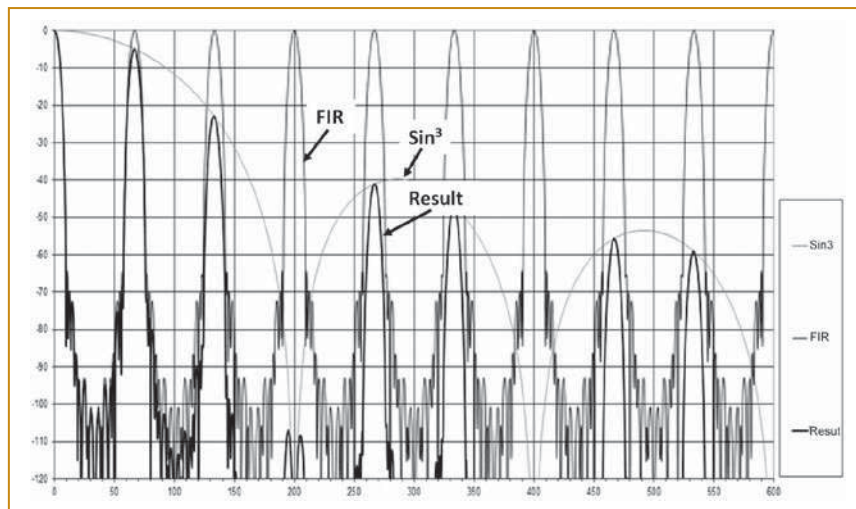


Рис. 6. Частотная характеристика последовательного включения КИХ и sinc3-фильтров

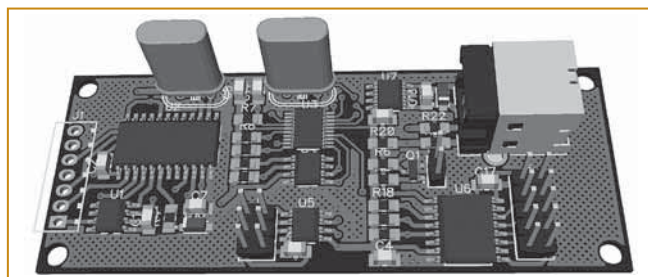


Рис. 8. 3D-модель разработанного модуля

*Сила правит миром, а не мысль, но мысль пользуется силой.*

Блез Паскаль

о текущем значении, а последний байт играет роль «разделителя» посылок (hex-код 0x0A).

#### Заключение

Таким образом, спроектированный модуль являются универсальным обработчиком сигналом с тензодатчиков, который позволяет:

1) формировать знакопеременное питающее напряжение для подключенного тензометрического преобразователя для устранения влияния термо-ЭДС на результаты измерений;

2) обеспечивать аналого-цифровое преобразование выходного сигнала тензометрического датчика с высокой точностью (до 0,05% от полной шкалы измерений);

3) выполнять цифровую фильтрацию результатов измерений с подавлением помех на частотах 50, 100 и 150 Гц;

4) формировать скоростной поток данных с помощью шины USB (Full Speed) для передачи данных промышленному контроллеру или другим устройствам обработки данных.

Предложенная структура в перспективе позволяет производить обработку не только сигналов с тензодатчиков, но и реализовывать управление контроллеров шагового двигателя с выполнением

необходимых расчетов ускорения и торможения, поддержанием требуемых характеристик перемещения и скоростной обработки аварийных ситуаций типа «перегрузки датчика» и «аварийных остановок» шагового двигателя.

#### Список литературы

1. *Фатыхов Ю.А., Агеев О.В.* Разработка весоконтрольного модуля для мехатронного комплекса порционирования пищевых продуктов // Научный журнал НИУ ИТМО. 2014. № 3. с. 235-258.
2. Digital Load Cells A Comparative Review of Performance and Application // The Institute of Measurement and Control. London. 2003. 14 p.
3. *Zwijze A.* Micro-machined high capacity silicon load cells // PhD Thesis University of Twente. Enschede. The Netherlands. 2000. 211 p.
4. *Чукан Й., Костиков К.* Тензометрические датчики силы // Компоненты и технологии. 2010. № 1. с. 16-18.
5. *Brian Pisani.* Digital Filter Types in Delta-Sigma ADCs//Application Report. Texas Instruments Incorporated. 2017. 8 p.
6. Bridge Transducer ADC AD7730/AD7730L // Analog Devices Incorporated. Norwood. USA. 2012. 53 p.
7. *Акулов П.А., Петрешин Д.И., Сырых А.Д.* Автоматизация испытаний электрических соединителей // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. 2018. №3. с. 100-106.
8. *Акулов П.А., Петрешин Д.И.* Автоматизированная установка измерения силы сочленения и расчленения единичного контакта электрического соединителя // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. №5 (58). с. 66-72.

*Акулов Павел Александрович – аспирант, ФГБОУ ВО «БГТУ»,  
Сырых Андрей Дмитриевич – генеральный директор ООО «КОНСУТРУКТОР».  
E-mail: Akulov.Paul@mail.ru, Andrew@Syrykh.com*

#### "Центр2М" представил комплексную систему машинного зрения CenterVision

Оператор IoT-решений "Центр2М" (Россия) представил комплексную систему машинного зрения CenterVision на конференции IBM Think в США.

Ежегодная конференция IBM Think, которая в 2019 г. прошла в Сан-Франциско, — одно из крупнейших мероприятий ИТ-сферы, регулярно привлекающее внимание ведущих игроков отрасли. Каждый год конференция открывает для компаний новые возможности использования искусственного интеллекта. В числе спикеров и участников мероприятия традиционно выступают крупнейшие компании и исследовательские организации мира: Visa, MIT Laboratories, Husqvarna Group, Hyundai Group, Harvard University и др. В этом году "Центр2М" стала одной из приглашенных компаний из России.

Сегодня в России проекты в области искусственного интеллекта привлекают все больше инвестиций. В центре внимания — проекты для крупного

и среднего бизнеса, транспортной сферы, электроэнергетики. Российские Hi-tech-компании разрабатывают уникальные решения, которые позволяют отечественному бизнесу продвигать внутренние разработки на мировой рынок.

Система промышленной видеоаналитики CenterVision построена на основе решения IBM PowerAI Vision и использует нейронные сети для распознавания объектов. Точность распознавания — до 98%. Решение позволяет отслеживать производственный процесс в режиме, приближенному к реальному времени, передает автоматическое оповещение в ситуационный центр, готовит отчеты по всем фактам нарушения правил безопасности. На основе анализа поступающих данных компании могут прогнозировать дальнейшее развитие ситуации и оперативно предотвращать нежелательные последствия инцидентов.

[Http://www.itweek.ru](http://www.itweek.ru)