

УДК 629.03

ЛЕ ВАН НГИА, магистр техн. наук
аспирант кафедры «Автомобили»¹
E-mail: nghiaminsk@gmail.com

НГО ФЫОНГ ЛЕ, канд. техн. наук
исследователь научного энергетического института²

НГУЕН ЧОНГ ХОАН, канд. техн. наук
доцент кафедры «Автомобили и спецмашины»³

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

²Академия науки и технологии Вьетнама, г. Ханой, Вьетнам

³Университет Ханоя техники и науки, г. Ханой, Вьетнам

Поступила в редакцию 29.05.2018.

ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ БЕСКОНТАКТНОГО ДАТЧИКА КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА ВРАЩАЮЩИХСЯ ВАЛАХ

В статье приводится принципиальная схема бесконтактного датчика крутящего момента (БДКМ) на вращающихся валах на примере карданного вала грузового автомобиля для измерения динамического крутящего момента трансмиссии в диапазоне 0...10 кНм, также описывается его метод проектирования и изготовления. Даются рекомендации о выборе, расположении и наклейке тензорезисторов при изготовлении датчика и расчеты усилителей сигналов. Выполнено моделирование модулей датчика в программном пакете Proteus для подтверждения работоспособности собранных схем подключения электронных компонентов. Приведены экспериментальные исследования для подтверждения работоспособности и составления основных технических характеристик разработанного датчика.

Ключевые слова: бесконтактный датчик крутящего момента, тензорезистор, мостовая схема подключения, усилитель, карданный вал, опытный образец, грузовой автомобиль, Proteus

Введение. Определение и регистрация крутящего момента, присутствующего практически во всех расчетах трансмиссионных элементов транспортных средств, являются актуальной задачей при изучении динамических процессов на вращающихся валах в области автомобилестроения. На сегодняшний день тензорезисторы используют в основном в качестве чувствительного элемента для измерения механических деформаций, в том числе для измерения крутящего момента. В процессе работы вала изменение сопротивления чувствительного элемента пропорционально крутящему моменту на нем и регистрируется по электрическому сигналу на выходе. Для передачи сигнала от тензорезисторов, находящихся на вращающихся валах, традиционно применяются контактные или бесконтактные токосъемники. К сожалению, комплект бесконтактного датчика крутящего момента в диапазоне 0...10 кНм на вращающихся валах, произведенный отечественной промышленностью или предприятиями стран СНГ, стоит очень дорого (около 5 тыс. долл. США) и его неудобно использовать во многих случаях из-за дополнительной установки сложных механических аппаратов [1]. В связи с названной проблемой создание нового поколения БДКМ,

соответствующего техническим требованиям, доступного по цене, удобного в использовании, будет актуально. В данной статье приводится метод проектирования и изготовления бесконтактного датчика крутящего момента на вращающихся валах на примере карданного вала грузового автомобиля для измерения динамического крутящего момента трансмиссии в диапазоне 0...10 кНм. Изготовленные по данному методу датчики рекомендуются установить на месте, где имеется открытый доступ, т. к. требуется пространство для наклейки тензорезисторов и установки составных модулей. Такие датчики могут применяться при стендовых и эксплуатационных исследованиях для регистрации крутящего момента, а также в качестве информационных элементов в мехатронных системах управления автомобилем.

Основные положения тензометрии. Измерение с помощью тензорезисторов основано на изменении его сопротивления под внешними воздействиями. В области механики сопротивление тензорезисторов изменяется за счет его деформации, которая возникает под действующей силой. Деформация, находящаяся в пределе текучести, по направлению действия силы подчинена закону Гука и описывается уравнением:

$$\sigma = \frac{E}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R},$$

где σ — напряжение в материале, МПа; E — модуль упругости, МПа; $\frac{\Delta R}{R}$ — относительное изменение сопротивления тензорезистора; k — чувствительность тензорезистора.

Для повышения точности измерения тензорезисторы должны располагаться максимально точно по направлению к оси площади, где происходит только деформация по растяжению или сжатию.

Поэтому прежде всего перед тензометрией необходимо проанализировать нагрузочный режим для определения положения главной площади и места расположения чувствительных элементов.

В литературных источниках по курсу «Сопротивление материалов» [2] известно, что при кручении отдельные элементы вала испытывают деформацию чистого сдвига и главное напряжение действует по площадке, наклоненной под углом 45° к оси вала. Тензорезисторы следует расположить на пересечении главной площади с поверхностью вала, т. е. по винтовой линии, образующей с осью вала угол 45° .

В случаях, если определение пересечения главной площади с поверхностью детали затруднено из-за сложности нагрузочного режима, то следует использовать хрупкие покраски. На основании оставшегося изображения тонкого слоя хрупкой покраски на поверхности детали и нужной измеряемой величины выбираются варианты расположения тензорезисторов.

При измерении крутящего момента на валах используют несколько вариантов расположения тензорезисторов, как изображено на рисунке 1 [3]. Вариант с четырьмя тензорезисторами, подключенными по полной мостовой схеме на рисунке 1 б, в, г, д, является наиболее рациональным размещением с точки зрения компенсации влияния действующих на валу мешающих факторов, таких как температура, осевая и изгибная нагрузки. При наличии небольшого изгибающего момента (в порядке крутящего момента) и отсутствии точных приборов для определения положения по цилиндрической трубе, для повышения точности измерения рекомендуется расположить тензорезисторы по схеме на рисунке 1 в.

В процессе эксплуатации грузового автомобиля, благодаря шлицевому соединению между составными трубами карданного вала, на него практически отсутствуют осевые нагрузки и нагрузки по изгибу, а действует только крутящий момент от коробки передач. Во избежание влияния от случайного изгиба на точности измерения рекомендуется расположить тензорезисторы как можно ближе к опоре трубы с большим сечением карданного вала.

На практике при эксплуатации грузового автомобиля для измерения крутящего момента удобнее всего использовать фольговые тензорезисторы розеточного типа 2ФКРВ, наклеенные на вал по варианту на рисунке 1 в и соединенные по схеме полного моста.

С целью увеличения точности измерения и для избежания от балансировки моста, тензо-

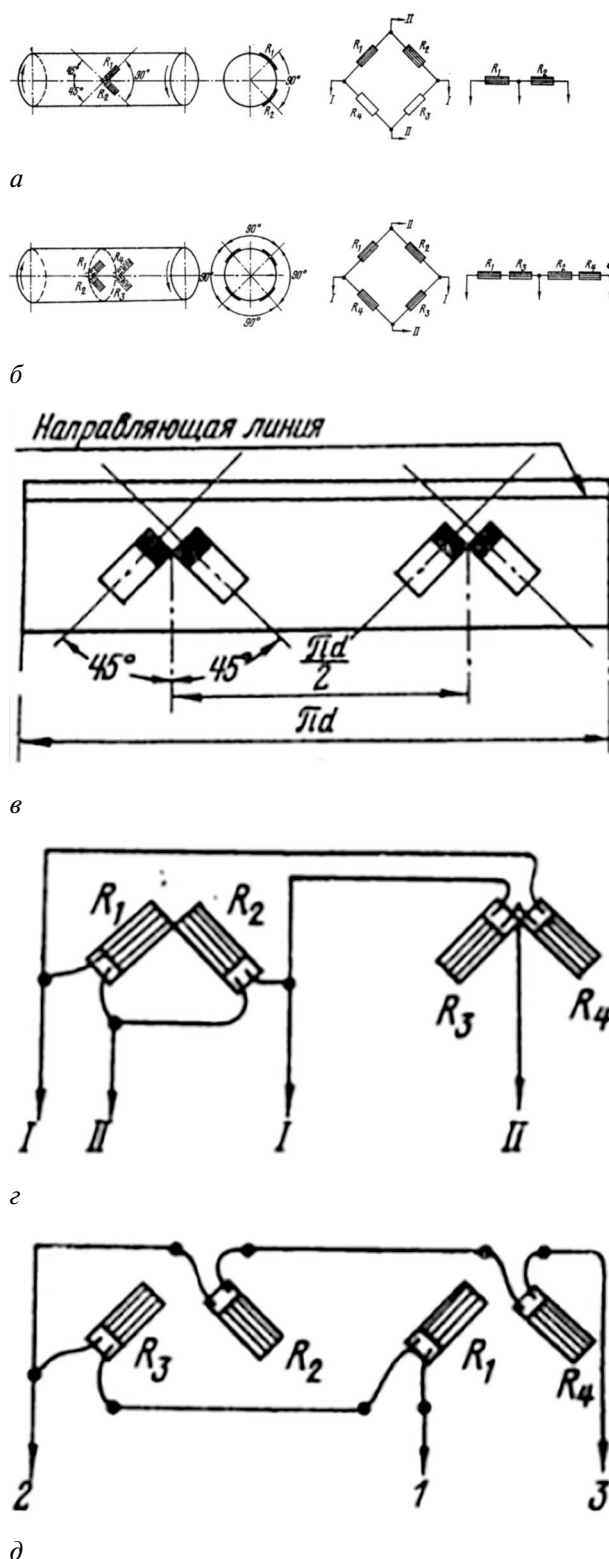


Рисунок 1 — Схема расположения тензорезисторов на валу [3]

резисторы выбираются из партии по минимальному отличию сопротивления. В данной работе были выбраны 4 тензорезистора с сопротивлением $R_1 = 89,72 \text{ Ом}$, $R_2 = 89,79 \text{ Ом}$, $R_3 = 89,83 \text{ Ом}$, $R_4 = 89,61 \text{ Ом}$.

Для достижения лучших результатов измерения необходимо тщательно подходить к выбору производителя клея [4]. В данном случае был выбран холодный моментальный суперклей «Момент». Процесс наклейки тензорезисторов требует точности и аккуратности при выполнении отдельных технологических операций, неукоснительного соблюдения инструкций.

Для ориентации и соблюдения полной симметрии тензорезисторов, размещаемых на валу, следует пользоваться бумажным шаблоном (см. рисунок 1 в) [3]. На бумажной полоске длиной πd (d — наружный диаметр карданного вала) с максимально возможной точностью размечают осевые линии, вдоль которых вычерчивают прямоугольники по размеру применяемых тензорезисторов. В этих прямоугольниках вырезают окна, равные размеру тензорешетки. Вдоль одного из краев вычерчивают направляющую линию. Готовый шаблон наклеивается на подготовленный участок вала. Для того чтобы вал и бумажный шаблон были соосны, концы направляющей линии должны совпадать друг с другом. Затем наклеивают тензорезисторы так, чтобы решетки точно укладывались в предназначенные для них окна шаблона. После наклейки тензорезисторов соскабливают лишнюю бумагу и проводят герметизацию наклеенных тензорезисторов. Накле-

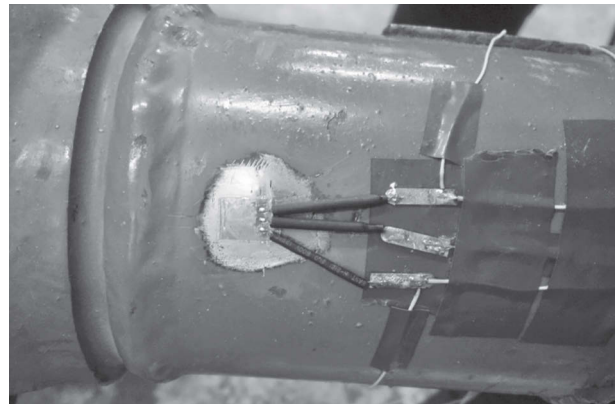


Рисунок 2 — Наклеенные тензорезисторы на карданном валу грузового автомобиля

енные тензорезисторы розеточного типа на карданном валу грузового автомобиля показаны на рисунке 2.

Принципиальная схема бесконтактного датчика крутящего момента. Известно, что при измерении крутящего момента выходной сигнал (напряжение) от тензорезисторов, подключенных по полной мостовой схеме, является аналоговым с низким значением (в пределах несколько мВ). Поэтому для регистрации данного сигнала электронными приборами требуется усилитель (рисунок 3, первый усилитель), увеличивающий измеряемое напряжение в возможном зарегистрированном диапазоне принимающего аппарата (см. рисунок 3, первый микроконтроллер).

Благодаря ряду преимуществ — удобство в применении, доступность цены при допусти-

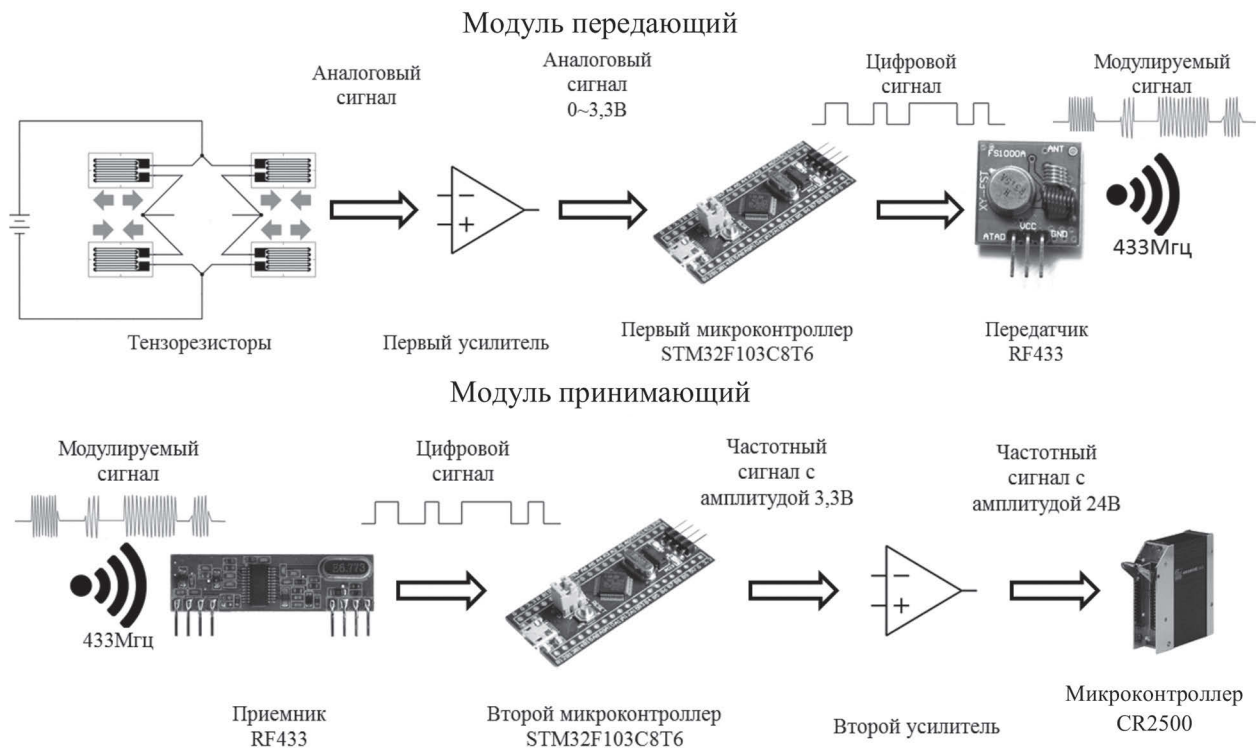


Рисунок 3 — Принципиальная схема БДКМ

мом качестве передачи, простота в использовании — в качестве беспроводной передачи сигнала от моста тензорезисторов используется цифровая радиопередача частотой 433 МГц [5].

Для преобразования аналогового сигнала после первого усилителя в цифровой применяется микроконтроллер STM32F103C8T6, дающий возможность оцифровки сигнала по разному алгоритму и стандарту и подходящий по стоимости (около 10 тыс. долл. США) [6]. Цифровой сигнал от первого микроконтроллера передается к передатчику, после чего передается в окружающее пространство к приемнику.

Сигнал, полученный от приемника, передается на второй микроконтроллер для расшифровки в нужной форме. Выходной цифровой сигнал после второго микроконтроллера является частотным с амплитудой 3,3 В, по его частоте можно судить о величине крутящего момента.

Расчет усилителей. Значение выходного напряжения моста при нулевой деформации вала определяется по формуле [7]:

$$\Delta V = V \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} = 3300 \frac{89,79 \cdot 89,83 - 89,72 \cdot 89,61}{(89,72 + 89,83)(89,79 + 89,61)} = 2,55 \text{ мВ},$$

где $V = 3300 \text{ мВ}$ — напряжение питания моста.

Значение выходного напряжения моста при максимальной деформации вала определяется по формуле [3]:

$$\Delta V_{\max} = V \cdot 10^4 \cdot \frac{kDM_{\text{кmax}}(1+\mu)}{E(D^4 - d^4)}, \quad (1)$$

где $D = 98,5 \text{ мм}$ и $d = 94 \text{ мм}$ — наружный и внутренний диаметры вала соответственно; $\mu = 0,28$ — коэффициент Пуассона материала вала; $M_{\text{кmax}}$ — максимальный крутящий момент на валу; $k = 1,98$ — чувствительность данной партии фольгового тензорезистора.

Максимальный крутящий момент на карданном валу в основном зависит от максимального момента двигателя и определяется по формуле [8]:

$$M_{\text{кmax}} = k_d u_{\text{кп}} M_{\text{emax}}, \quad (2)$$

где $k_d = 2$ — максимальный коэффициент динамичности в трансмиссии автомобиля; $u_{\text{кп}} = 7,82$ — максимальное передаточное число коробки передач автомобиля; $M_{\text{emax}} = 650 \text{ Нм}$ — максимальный крутящий момент двигателя.

При данных значениях параметров, представленных в формулах (1) и (2), получаются значения максимального крутящего момента на карданном валу и соответственного максимального выходного напряжения:

$$M_{\text{кmax}} = 10\,166 \text{ Нм}; \quad \Delta V_{\max} = 25,4 \text{ мВ}.$$

Сигнал с тензометрического моста колеблется в пределах $2,55 \div 25,4 \text{ мВ}$, а максимальное напряжение аналогового входа микроконтроллера STM32F103C8T6 составляет 3,3 В [6], то есть коэффициент усиления не должен превышать 130 (усиливать сигнал с моста необходимо не более чем в 130 раз). Исходя из вышеизложенного, в схеме использовался высокопрецизионный операционный усилитель (ОУ) постоянного тока ОРА2277ра в корпусе DIP-8, технические характеристики которого приведены в работе [9]. Сигнал с тензометрического моста, пройдя первый каскад на базе дифференциального усилителя, увеличивался в 120 раз. Формула, описывающая выходной сигнал дифференциального усилителя (рисунок 4):

$$V_{\text{вых}} = V_+ \frac{(R_5 + R_6)R_8}{(R_8 + R_7)R_6} - V_- \frac{R_5}{R_6},$$

где $V_{\text{вых}}$ — выходной сигнал усилителя; V_+ — сигнал на положительном входе ОУ; V_- — сигнал на отрицательном входе ОУ.

В частном случае при $R_6 = R_7 = 1 \text{ кОм}$ и $R_5 = R_8 = 120 \text{ кОм}$ коэффициент усиления дифференциального усилителя:

$$K_{\text{ус}} = \frac{V_{\text{вых}}}{V_+ - V_-} = \frac{R_5}{R_6} = \frac{120}{1} = 120.$$

Задача второго усилителя (см. рисунок 3) — увеличение амплитуды выходного сигнала от второго микроконтроллера с 3,3 В до 24 В при неизменной его частоте. Для этой цели использовался операционный усилитель LMS358n, технические характеристики которого приведены в работе [10]. Усилитель, подключающийся по схеме на рисунке 5, работает как компаратор напряжения. Входное напряжение (V_{IN}) усилителя сравнивается

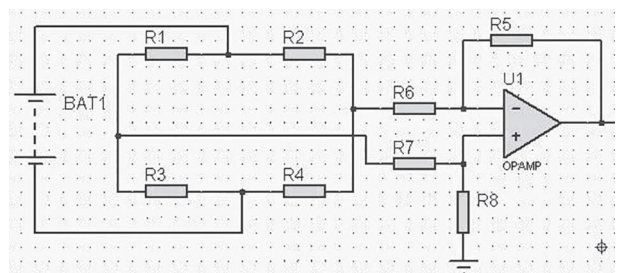


Рисунок 4 — Схема подключения первого усилителя

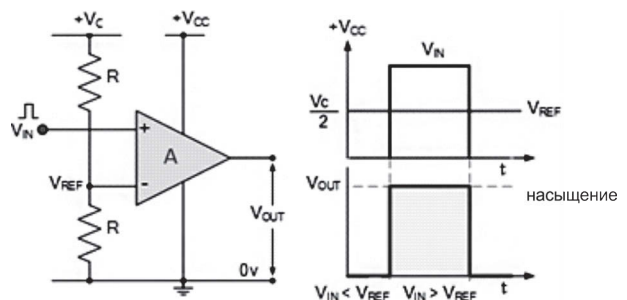


Рисунок 5 — Принципиальная схема работы второго усилителя [10]

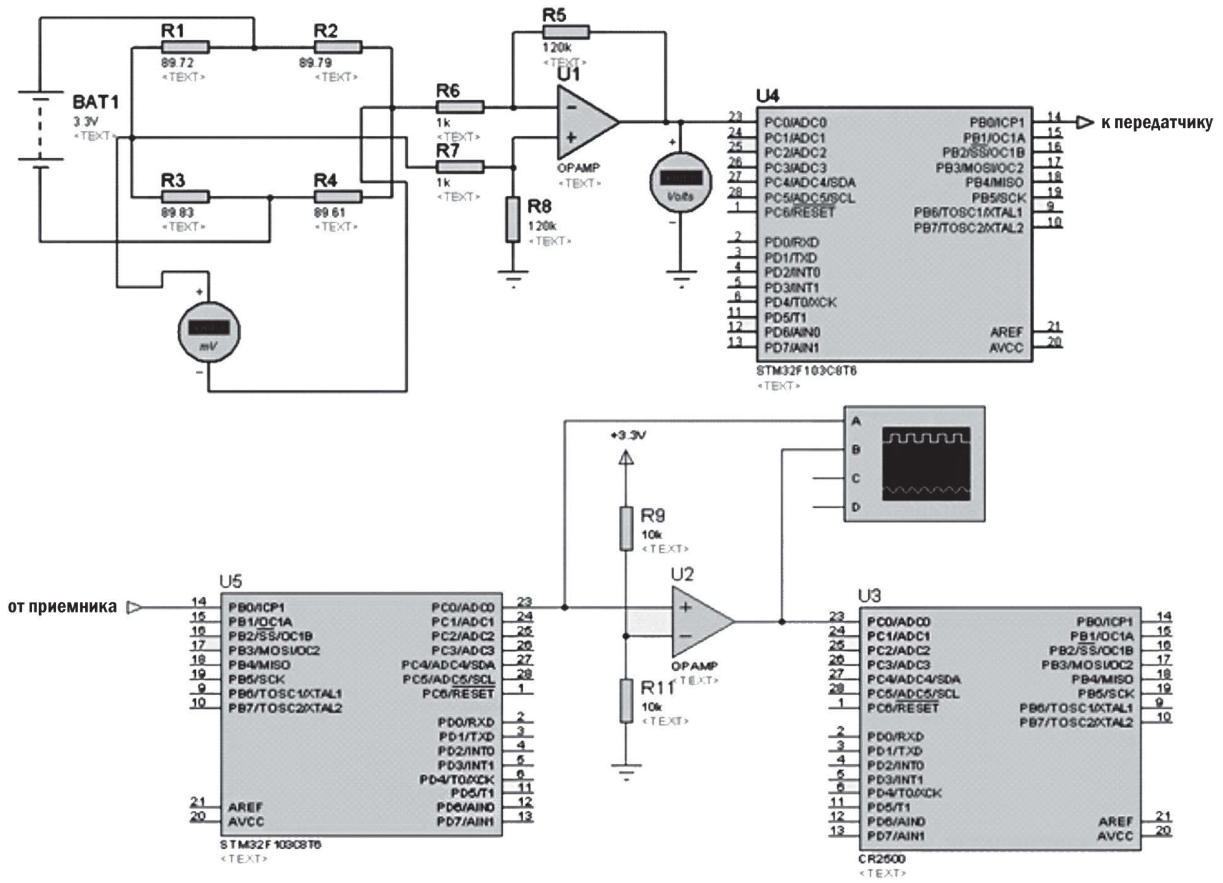
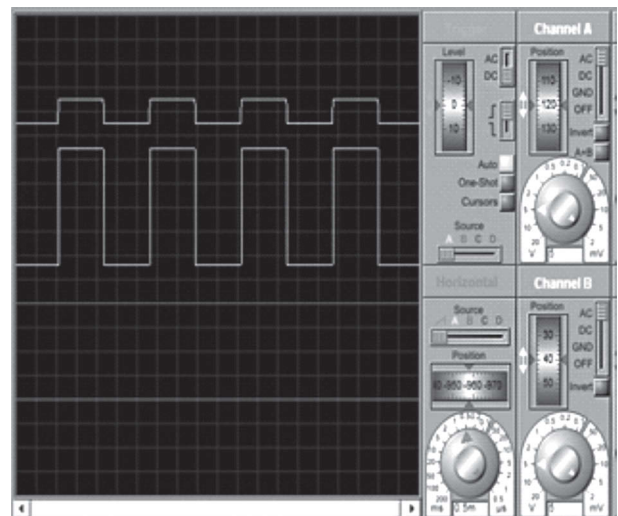
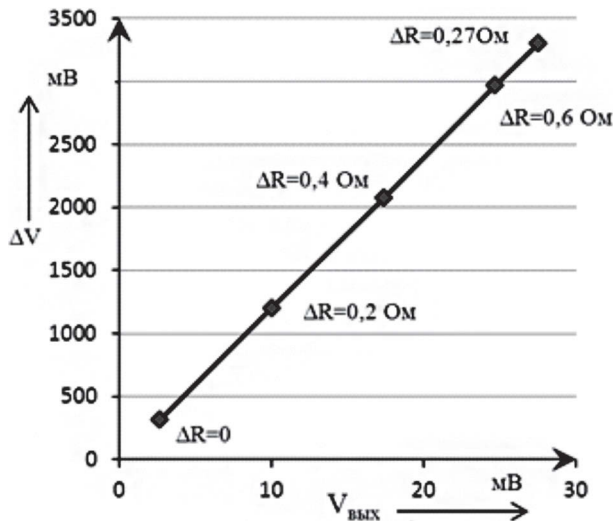


Рисунок 6 — Модель БДКМ в программе Proteus

с заданным уровнем напряжения (V_{REF}), и выходной сигнал будет принимать «0» или «1» соответственно V_{REF} больше или меньше V_{IN} . В качестве заданного напряжения V_{REF} для сравнения принимается $1/2 V_C$, полученное при разделении напряжения уровня «1» усиленного сигнала V_C двумя одинаковыми резисторами. При выполнении условия $V_{IN} > V_{REF}$ на выходе формируется напряжение

насыщения операционного усилителя, значение которого приблизительно равно питающему напряжению усилителя (V_{CC}) [10].

Для проверки работоспособности разработанной системы перед изготовлением было выполнено моделирование упрощенной системы в программном пакете Proteus (рисунок 6). Результаты моделирования представлены на рисунке 7.



а

б

Рисунок 7 — Результаты моделирования разработанного БДКМ: а — зависимость между выходными сигналами от тензометрического моста и первого усилителя (см. рисунок 3); б — входные сигналы от второго усилителя и микроконтроллера CR2500

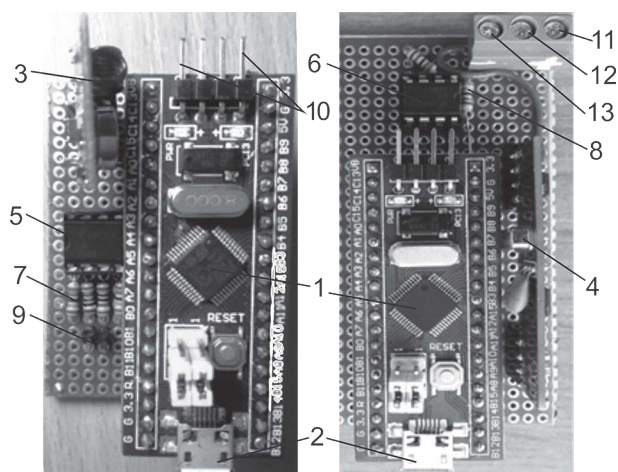


Рисунок 8 — Готовые модули БДКМ: *а* — модуль передающий; *б* — модуль принимающий; 1 — микроконтроллеры STM32F103C8T6; 2 — питание (5В) микроконтроллеров, беспроводной передачи RX433, усилителя OPA2277ра; 3 — передатчик; 4 — приемник; 5 — усилитель OPA2277ра; 6 — усилитель LMS358п; 7 — резисторы, подключенные к усилителю OPA2277ра; 8 — резисторы, подключенные к усилителю LMS358п; 9 — выходной сигнал от тензометрического моста; 10 — питание (3,3 В) тензометрического моста; 11 — плюс питания (24В) усилителя LMS358п; 12 — выходной сигнал к микроконтроллеру CR2500; 13 — минус питания (24В) усилителя LMS358п

После подтверждения работоспособности разработанного БДКМ путем моделирования изготовлены модули по вышеописанным схемам. Готовые модули, показанные на рисунке 8, имеют малые габариты 70 × 35 × 30 мм (Д × Ш × В) и вес 70 г (включая пластмассовую коробку). При дальнейшем исследовании имеется возможность уменьшить габаритные размеры и вес в 3–4 раза при сохранении работоспособности.

Для повышения качества беспроводной передачи модуль принимающий устанавливается максимально близко к модулю передающему, наклеиваемому на карданный вал. По техническим данным о беспроводных аппаратах [5], рабочее расстояние достигает 100 м, однако по практическим экспериментам, беспроводная передача работает без ошибок при расстоянии меньше 10 м. Поэтому рекомендуется установить модуль приемника в пределах 10 м от передатчика, и, чем ближе между собой, тем меньше вероятность появления ошибок при передаче. Следующим этапом после установки готовых модулей БДКМ является тарировка.

Тарировка БДКМ. Тарировка позволяет не только установить связь между показателем регистрирующей системы и значением измеряемой величины, но и проверить работу системы в диапазоне изменения входной величины.

Исследования по тарировке выполнены в стендовом зале учебного корпуса 2 БНТУ при комнатной температуре (от 5 до 25 °С) следующим образом: на вход измерительной системы подаются заранее известные значения измеряемой

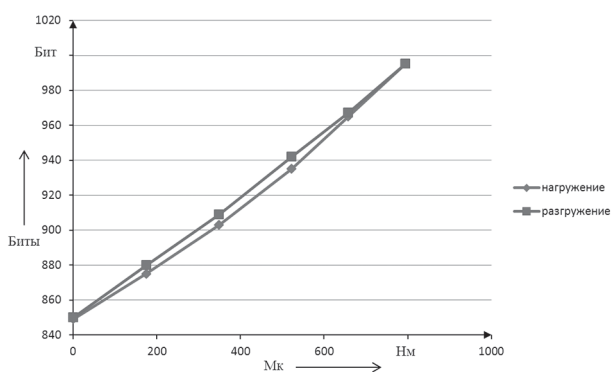


Рисунок 9 — Тарировочный график БДКМ

величины, например крутящий момент на карданном валу, а на выходе фиксируют показатели системы на эти воздействия. Крутящий момент на карданном валу создается путем приложения нагрузки известным весом на мерной балке длиной 1 м, жестко соединенной с карданным валом. На рисунке 9 показаны результаты тарировки БДКМ при нагружении и разгрузке крутящего момента на карданном валу.

Таблица — Основные технические характеристики разработанного БДКМ

№	Технические характеристики	Значения
1	Диапазон изменения крутящего момента, кНм	0...10
2	Максимальный механический гистерезис, Нм	30
3	Линейность кривой нагружения, %	0,15
4	Линейность кривой разгрузки, %	0,1
5	Погрешность измерения (включая нелинейности и гистерезис), %	0,3
6	Запас по перегрузке, %	110
7	Напряжение питания модуля передающего, В	5 или 3,3
8	Напряжение питания модуля принимающего, В	24
9	Тип выходного сигнала	цифровой
10	Частота дискретизации, Гц	960
11	Частота передаваемого сигнала, Гц	300
12	Частота несущей волны радиопередачи, МГц	433
13	Допускаемая максимальная частота вращения вала, об/мин	5000
14	Температурный режим, °С	+5...+25
15	Габариты (Д × Ш × В), мм	70 × 35 × 30
16	Вес модуля передающего, г	70

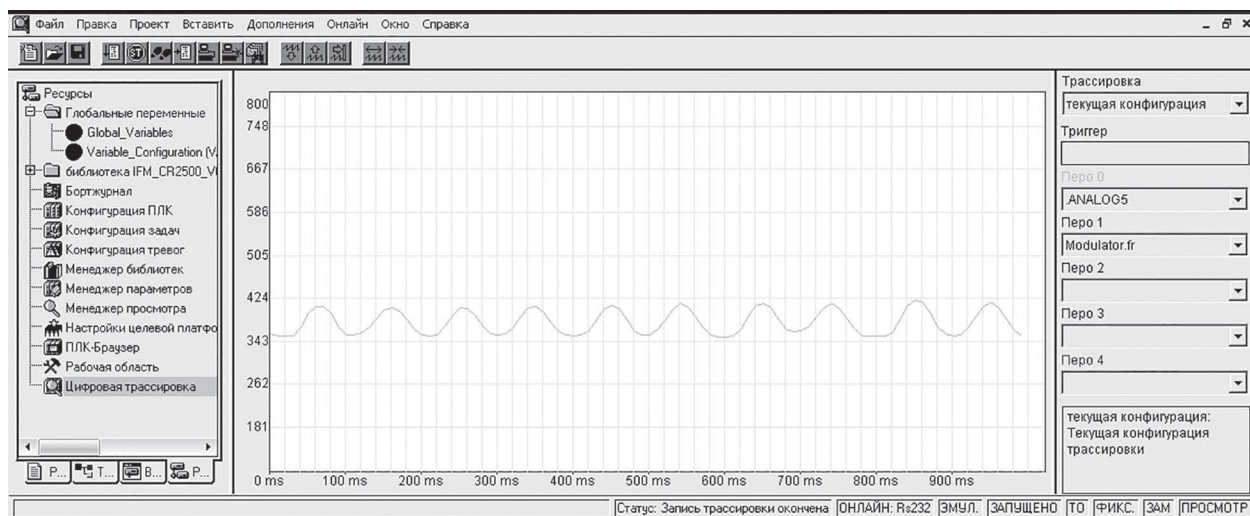


Рисунок 10 — Осциллограмма динамического момента с синусоидальной формой

На основании полученных экспериментальных результатов были составлены основные технические характеристики разработанного БДКМ (таблица).

Полученные в таблице значения подтверждают работоспособность разработанной измерительной системы при статической нагрузке. Кроме того, на испытательном стенде проводилась проверка реакции разработанного БДКМ под динамической нагрузкой, и полученная на рисунке 10 осциллограмма показывает достоверность в измерении динамического крутящего момента при синусоидальной форме с периодом 90 мс и амплитудой 100 Нм. Проверка работоспособности и точностных характеристик разработанного БДКМ при вращении карданного вала будет выполнена на последующих этапах исследований.

Разработанный бесконтактный датчик крутящего момента имеет технические характеристики, подобные аналогам отечественной промышленности [1] и зарубежных производителей [11, 12], и удовлетворяет требованиям по погрешности измерения, по диапазону изменения и по возможности совместной регистрации с другими сигналами при исследовании динамического процесса карданных валов.

Заключение. Разработан подход к методу проектирования и изготовлению БКДМ в диапазоне 0...10 кНм на вращающихся валах на примере карданного вала грузового автомобиля. Результатами экспериментальных исследований подтверждается работоспособность разработанного БДКМ при статической и динамической нагрузке. Имеющиеся технические характеристики разработанного БДКМ удовлетворяют требованиям при исследовании динамических процессов трансмиссии автомобиля и не уступают зарубеж-

ным и отечественным аналогам при пониженной себестоимости изготовления. На базе разработанного устройства можно создать тензометрические муфты для измерения крутящего момента на вращающихся валах.

Список литературы

1. Тилком [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.tilkom.com/production/gauges/torque/m40/>. — Дата доступа: 01.06.2018.
2. Беляев, Н.М. Сопrotивление материалов: учеб. пособие / Н.М. Беляев. — М.: Наука, 1965. — 856 с.
3. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии / В.А. Шушкевич. — Минск: Высшая школа, 1975. — 352 с.
4. Zetlab Public [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.youtube.com/watch?v=IO4gK4UyOS0/>. — Date of access: 01.06.2018.
5. Mantech electronics [Electronic resource]. — Mode of access: http://www.mantech.co.za/Datasheets/Products/433Mhz_RF-TX&RX.pdf/. — Date of access: 01.06.2018.
6. STMicroelectronics [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00161566.pdf/>. — Date of access: 01.06.2018.
7. Мехеда, В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А. Мехеда. — Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. — 56 с.
8. Проектирование полноприводных колесных машин / Б.А. Афанасьев [и др.]. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — Т. 2. — 537 с.
9. Texas Instruments [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.ti.com/lit/ds/sbos079b/sbos079b.pdf/>. — Date of access: 01.06.2018.
10. Texas Instruments [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf/>. — Date of access: 01.06.2018.
11. Lorenz messtechnik gmbh [Electronic resource]. — Mode of access: http://www.lorenz-m.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=168:tekhnikheskie-dannye-dr-2643&catid=96:tekhnikheskie-dannye/. — Date of access: 01.06.2018.
12. Beijing China Aviation Science and Electrical Control Technology [Electronic resource]. — Mode of access: https://zhonghangedian.en.alibaba.com/product/60479471199-803134545/precise_torque_sensor.html?spm=a2700.icbuShop.prewdfa4cf.101.22ef3ce402MJb3. — Date of access: 01.06.2018.

LE VAN NGHIA, Mas. Techn. Sc.
Ph.D. Student of the Department "Automobiles"¹
E-mail: nghiaminsk@gmail.com

NGO PHUONG LE, Ph. D. in Eng.
Researcher of Institute of Energy Science²

NGUYEN TRONG HOAN, Ph. D. in Eng.
Assistant Professor of the Department "Automotive engineering"³

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

³Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

Received 29 May 2018.

PROTOTYPE OF WIRELESS TORQUE SENSOR ON TRUCK ROTARY SHAFT

The paper presents principle scheme of wireless torque sensor on rotary shafts, for example truck cardan shaft, to measure dynamic torque of transmission in range of 0...10 kNm, also describes designing and manufacturing method. Recommendations on selecting, arranging and gluing strain-gauge in manufacturing, and on calculating signal amplifier are given. A simulation of sensor modules was carried out in software package Proteus to confirm working efficiency of assembled schema of electronic components. Experiment was conducted to confirm working efficiency and to collect performance specifications of the sensor.

Keywords: wireless torque sensor, strain-gauge, bridge circuit, amplifier, cardan shaft, prototype, truck, Proteus

Reference

1. *Tilkom*. Available at: <http://www.tilkom.com/production/gauges/torque/m40/> (accessed 1 June 2018).
2. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov: uch. posobie* [Resistance of materials: tutorial]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 856 p.
3. Shushkevich V. A. *Osnovy elektrotenzometrii* [Fundamentals of electrotenzometry]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1975. 352 p.
4. Nakleyka tenzorezistorov [Gluing of strain gauges]. *Zetlab Public*. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=IO4gK4UyOS0/> (accessed 1 June 2018).
5. *Mantech electronics*. Available at: http://www.mantech.co.za/Datasheets/Products/433Mhz_RF-TX&RX.pdf/ (accessed 1 June 2018).
6. *STMicroelectronics*. Available at: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00161566.pdf/> (accessed 1 June 2018).
7. Mekheda V.A. *Tenzometricheskii metod izmereniya deformatsiy: ucheb. posobie* [Strain-gauge measuring method: tutorial]. Samara, Samarskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskii universitet Publ., 2011. 56 p.
8. Afanasev B.A., Zheglov L.F., Zuzov V.N., Kotiev G.O., Polungyan A.A., Fominykh A.B. *Proektirovanie polnoprivodnykh kolesnykh mashin* [Design of all-wheel drive machines]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2008. 537 p.
9. *Texas Instruments*. Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/sbos079b/sbos079b.pdf> (accessed 1 June 2018).
10. *Texas Instruments*. Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf> (accessed 1 June 2018).
11. *Lorenz messtechnik gmbh*. Available at: http://www.lorenz-m.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=168:tekhicheskie-dannye-dr-2643&catid=96:tekhicheskie-dannye/ (accessed 1 June 2018).
12. *Beijing China Aviation Science And Electrical Control Technology*. Available at: https://zhonghangkedian.en.alibaba.com/product/60479471199-803134545/precise_torque_sensor.html?spm=a2700.icbuShop.prewdf4cf.101.22ef3ce4o2MJb3 (accessed 1 June 2018).