

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДАТЧИКА КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА ВАЛАХ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

DESIGN OF A TORQUE SENSOR ON THE SHAFTS OF A WHEELED TRACTOR

В.В. ГЕРАЩЕНКО, к.т.н.

В.П. ЛОБАХ, к.т.н.

Н.А. КОВАЛЕНКО, к.т.н.

Белорусско-Российский университет, Могилев,
республика Беларусь, mogilev-kovalenko@rambler.ru

V.V. GERASHCHENKO, PhD in Engineering

V.P. LOUBACH, PhD in Engineering

N.A. KOVALENKO, PhD in Engineering

Belarusian-Russian University, Mogilev, republic of Belarus,
mogilev-kovalenko@rambler.ru

Для повышения эффективности работы колесных тракторов необходимо улучшать их топливную экономичность и проходимость. Этого можно достичь применением на тракторах датчиков крутящего момента, устанавливаемых на карданных валах трансмиссии, текущие значения нагрузки с выхода которых может использоваться в системах автоматического управления движением трактора или субъективно водителем. Авторами предлагается методика выбора параметров такого датчика момента, в котором формируется напряжение, пропорциональное углам закручивания карданного вала и, соответственно, передаваемому крутящему моменту.

Ключевые слова: упругий вал, крутящий момент, датчик, диски с выступами и впадинами, катушки индуктивности, угол закручивания вала, напряжение, импульс напряжения.

To improve the efficiency of wheeled tractors, it is necessary to improve their fuel efficiency and patency. This can be achieved by the use of torque sensors installed on the driveshaft of the transmission on tractors, the current load value from the output of which can be used in automatic control of the tractor or subjectively by the driver. The authors propose a method of selecting the parameters of such a torque sensor, which generates a voltage proportional to the angles of the cardan shaft and, accordingly, the transmitted torque.

Keywords: elastic shaft, torque, sensor, disks with protrusions and depressions, inductors, shaft angle, voltage, voltage pulse.

Введение

Повышение топливной экономичности и тяговых свойств колесного трактора можно достичь, если правильно управлять топливоподачей двигателя. Для этого необходимо знать подводимый к нему от движителя момент сопротивления. Его можно измерить датчиками момента, устанавливаемыми на упругих валах трансмиссии и привода различных механизмов. Текущая информация с них может быть использована в системах автоматического управления движением трактора или субъективно водителем (например, для предотвращения перегрузки двигателя путем своевременного переключения передачи на более низшую по отношению к исходной). Кроме того, датчики крутящего момента могут использоваться для диагностирования различных агрегатов на стендах (например, при определении технического состояния коробок передач по их КПД, технического состояния двигателя по развиваемой мощности и др.).

Цель исследования

Разработка методики проектирования датчика крутящего момента, работа которого основана на использовании статической характеристики упругого вала.

Материалы и методы

Для преобразования крутящего момента, передаваемого упругим валом, в пропорциональное напряжение, используется свойство упругого вала, которое заключается в том, что его статическая характеристика, представляющая собой зависимость угла закручивания ψ упругого вала от передаваемого им крутящего момента M , имеет линейный характер (рис. 1). При этом необходимо выбирать упругий вал с наибольшей чувствительностью.

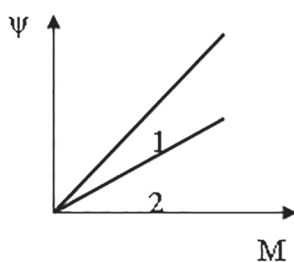


Рис. 1. Статическая характеристика упругих валов (вал 1 в сравнении с валом 2 обладает большей чувствительностью)

Для создания датчика крутящего момента на валах колесного трактора авторами использовано такое свойство упругих валов следующим образом. Было предложено установить по концам вала 1 тонкие металлические диски 2, 3 (рис. 2) с радиальными выступами и впадинами (рис. 3) и катушки индуктивности 4, 5, сердечники которых установлены на расстоянии около 1 мм от дисков 2 и 3. Диски устанавливаются на вал с высокой точностью совпадения момента прохождения передних кромок выступов обоих дисков относительно катушек индуктивности при вращении вала без его нагружения.

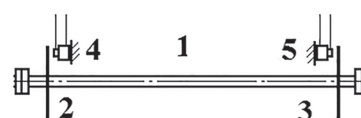


Рис. 2. Установка дисков и катушек индуктивности относительно вала

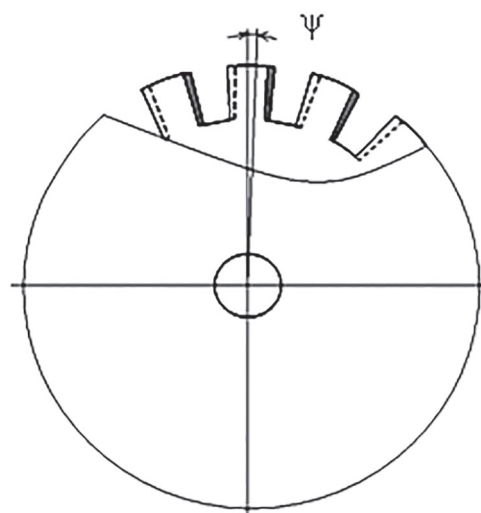


Рис. 3. Схема дисков и их углового смещения при нагружении вала

При нагружении вала 1 крутящим моментом диски 2 и 3, а следовательно, и их выступы и впадины вследствие закручивания вала смещаются на угол ψ , который пропорционален крутящему моменту M . Работоспособность и чувствительность датчика крутящего момента (рис. 4) зависит от правильного выбора угла закручивания вала и количества выступов и впадин дисков, что определяется расчетом.

Их выбор производится по следующей методике. При вращении упругого вала трактора и передаче им момента к ведущим колесам он закручивается на угол, пропорциональный ве-

личине передаваемого валом момента в соответствии с формулой:

$$\psi = \frac{M \cdot l}{G \cdot J}, \quad (1)$$

где M – крутящий момент, Н·м; l – длина упругого вала, м; G – модуль упругости, Па; J – момент инерции, кг·м².

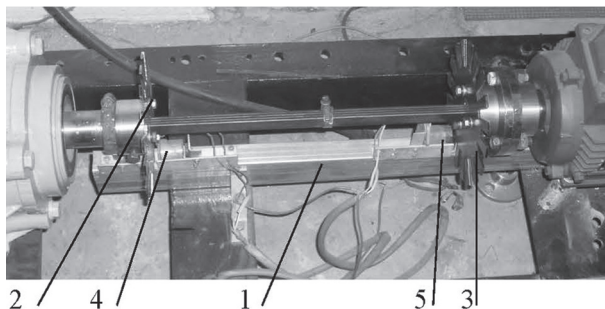


Рис. 4. Установка для нагружения вала:

- 1 – упругий вал; 2, 3 – диски;
4, 5 – катушки индуктивности

Приведем пример расчета вала и дисков. Примем наружный и внутренний диаметры вала соответственно из ГОСТ 8732 равными $D = 0,054$ м и $d = 0,050$ м. Крутящий момент примем равным $M = 1000$ Н·м. Тогда напряжение кручения вала равно

$$\begin{aligned} \sigma_{кр} &= \frac{16 \cdot D \cdot M}{\pi(D^4 - d^4)} = \\ &= \frac{16 \cdot 0,054 \cdot 1000}{3,14 \cdot (0,054^4 - 0,050^4)} = 122 \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (2)$$

Так как расчетное напряжение кручения вала меньше допустимого, равного 200 МПа, то вал удовлетворяет условию прочности.

Угол закручивания вала длиной $l = 0,7$ м под действием крутящего момента M равен:

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{M \cdot l}{G \cdot J} = \frac{57 \cdot 32 \cdot M \cdot l}{\pi \cdot (D^4 - d^4) \cdot G} = \\ &= \frac{57 \cdot 32 \cdot 1000 \cdot 0,7}{3,14 \cdot (0,054^4 - 0,050^4) \cdot 7,78 \cdot 10^{10}} = 2,38^\circ, \end{aligned} \quad (3)$$

где G – модуль упругости второго рода, Па.

Определим модуль упругости второго рода:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{2,1 \cdot 10^{11}}{2 \cdot (1 + 0,35)} = 7,78 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости первого рода, $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; μ – коэффициент Пуассона ($\mu = 0,3 \dots 0,4$).

Количество выступов и впадин на каждом диске должно быть по возможности наибольшим, что повышает точность измерения крутящего момента. Угловая ширина выступа и впадины ψ_d принимается из условия, что она должна быть больше расчетного угла закручивания вала. Так как для рассматриваемого примера $\psi = 2,38^\circ$, то угловую ширину впадин и дисков следует принять 5° . Тогда общее количество z_0 выступов и впадин одного диска будет равно 72 (5), а, соответственно, количество впадин и выступов на диске будет по 36.

$$z_0 = \frac{360}{\psi_d} = \frac{360}{5} = 72. \quad (5)$$

Работает и устроен датчик крутящего момента следующим образом. При прохождении выступов дисков 2 и 3 (рис. 2), установленных на концах упругого вала 1 возле магнитных сердечников катушек 4 и 5 индуктивности, на выводах катушек возникает непрерывное переменное напряжение U (рис. 5, а, 5, б), определяемое по формуле:

$$U = kwn \frac{d\Phi}{d\alpha}, \quad (6)$$

где k – коэффициент, зависящий от характеристик магнитной цепи; w – число витков обмотки; n – частота вращения диска; $d\Phi/d\alpha$ – изменение потока Φ в зависимости от угла поворота.

Характер изменения этого напряжения не позволяет применить его для создаваемого датчика крутящего момента. Его основным элементом которого является триггер с двумя входами, для работы которого необходимы импульсы напряжения. Импульсы напряжения (рис. 5, в, 5, г) можно получить дифференцированием и выпрямлением полученного переменного напряжения (рис. 5, а, 5, б) на выходах индуктивных катушек 4 и 5 с последующей подачей его на входы транзисторов триггера.

Таким образом, на выходах катушек появляются положительные импульсы напряжения (соответственно, рис. 5, в и 5, г) с периодом следования импульсов напряжения, равным τ (рис. 5, в). Так как диски 2 и 3 (рис. 2) вращаются вместе с валом 1, то импульсы напряжения появляются при прохождении каждого выступа дисков 2 и 3 соответственно возле катушек индуктивности 4 и 5. При этом на выходе катушки 5 появляется положительный импульс напряжения (рис. 5, г) с запаздыванием во времени на Δt .

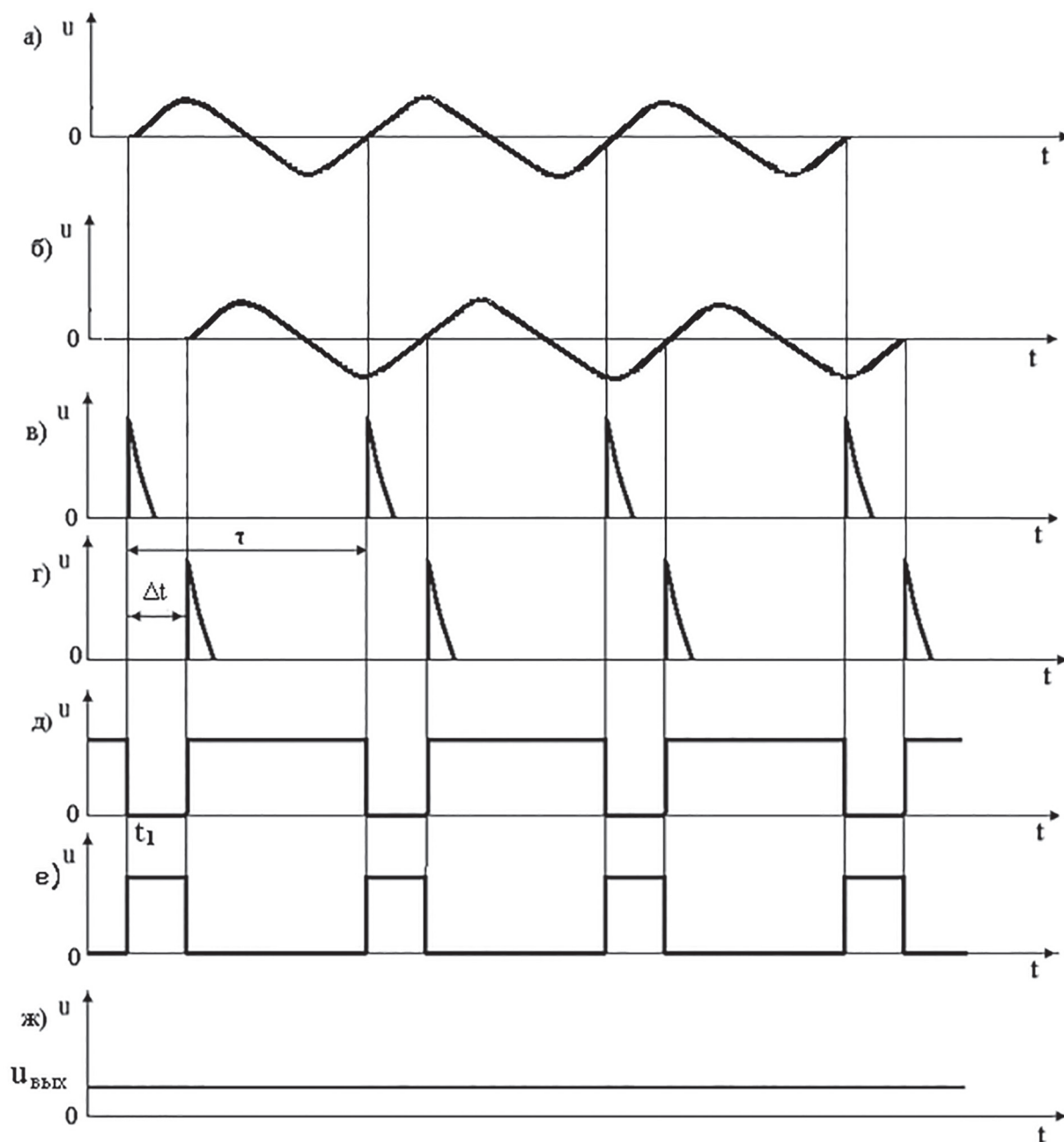


Рис. 5. Графики сигналов в цепях датчика крутящего момента триггера

Таким образом, для определения крутящего момента на упругом валу 1 (рис. 2) необходимо непрерывно измерять время Δt отставания второй последовательности положительных импульсов напряжения относительно первой последовательности импульсов напряжения.

Далее напряжение в виде прямоугольных импульсов (рис. 5, д, 5, е). формируется триггером 10 с двумя входами, которые подключаются к выходам дифференцирующих цепей 6 и 7 (рис. 6).

Среднее значение уровня напряжения можно получить интегрированием прямоу-

гольных импульсов на протяжении периода τ (рис. 5, з) по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} U_{\text{ВХ}} dt. \quad (7)$$

На схеме (рис. 6) датчика крутящего момента операция интегрирования выполняется с помощью интегрирующего элемента 20, состоящего из резистора 21 и конденсатора 22.

Полученный уровень напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ (рис. 5, ж) на выходе интегрирующего элемента 20 пропорционален передаваемому крутящему моменту.

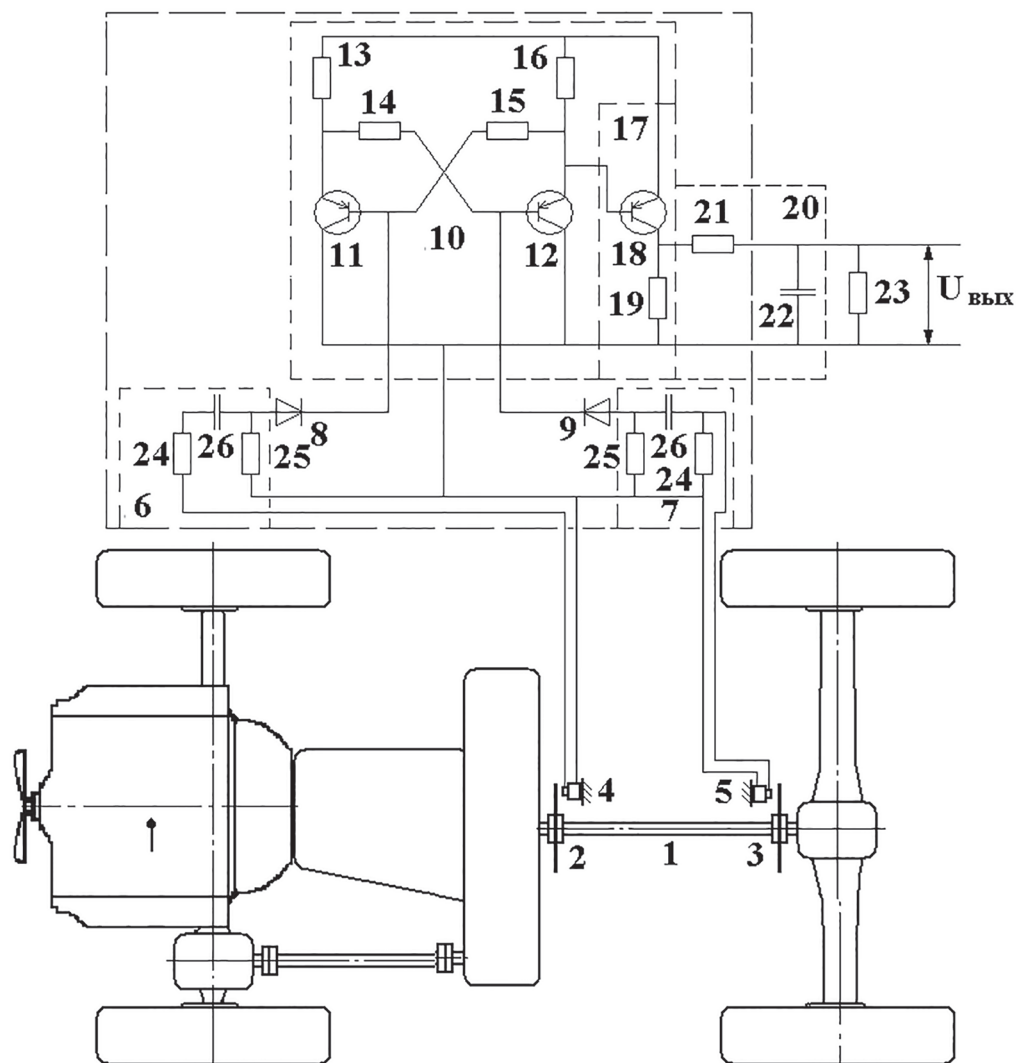


Рис. 6. Схема датчика крутящего момента

Разработанный датчик крутящего момента (рис. 6) содержит упругий вал 1 с установленными на его концах дисками 2 и 3 с прорезями и впадинами и расположенными рядом с дисками катушки индуктивности 4 и 5, дифференцирующие цепи 6, 7 с отсекающими диодами 8, 9, триггер 10, выполненный на первом 11 и втором 12 транзисторах и четырех резисторах 13, 14, 15, 16; при этом базы транзисторов 11, 12 соединены с выходами дифференцирующих цепей 6, 7 с отсекающими диодами 8, 9. С выходом триггера соединен эмиттерный повторитель 17, выполненный на транзисторе 18 и резисторе 19. К выходу эмиттерного повторителя подсоединена интегрирующая цепь 20, выполненная на резисторе 21 и конденсаторе 22. При этом выход интегрирующей цепи 20 соединен с выходным резистором 23. Каждая из дифференцирующих цепей 6 и 7 включает в себя резисторы 24, 25 и конденсатор 26.

Крутящий момент на валу 1 измеряется следующим образом. В исходном состоянии транзистор 11 триггера 10 закрыт, поэтому транзистор 12 на время $0-t_1$ (рис. 5) открыт. Напряжение на коллекторе транзистора 12 равно нулю (рис. 5, е), а на коллекторе транзистора 11 за это же время принимает максимальное значение (рис. 5, д). При вращении вала 1 и нагружении его крутящим моментом выступы и впадины дисков 2 и 3 проходят возле катушек индуктивности 4 и 5, вследствие чего на их выходах появляется напряжение (рис. 5, а, 5, б) в соответствии с формулой 6. Оно дифференцируется цепями 6, 7, на выходах которых образуются два разнополярных импульса. Выходные сигналы цепей 6 и 7 выпрямляются диодами 8 и 9, образуя положительные импульсы, которые подаются на базу транзисторов 11 и 12. Транзистор 11 открывается, а транзистор 12 закрывается, поэтому на коллекторе тран-

зистора 12 появляется положительное напряжение. На выходе дифференцирующих цепей 6 и 7 после выпрямления диодами 8 и 9 получаем импульсы напряжения в виде двух последовательностей (рис. 5, в, 5, з). При этом вторая последовательность импульсов (рис. 5, з) отстает от первой последовательности импульсов (рис. 5, в) на время Δt .

Далее формирование прямоугольных импульсов на выходе триггера 10 происходит аналогично описанному выше.

Полученные прямоугольные импульсы подаются на вход интегрирующей цепи 20 посредством эмиттерного повторителя 17, с помощью которого выполняется согласование высокого сопротивления на выходе триггера 10 с низким сопротивлением интегрирующей цепи 20. На выходе интегрирующей цепи 20 и на выходном резисторе 23 формируется напряжение, уровень которого пропорционален крутящему моменту на валу 1 (рис. 7).

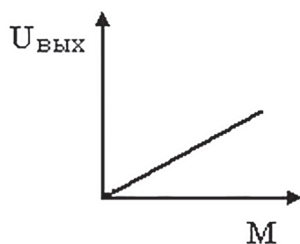


Рис. 7. Статическая характеристика разработанного датчика крутящего момента

Полученные экспериментально осциллограммы изменения напряжения в цепях разработанного датчика крутящего момента (рис. 8, а, 8, б) соответствуют теоретическим (рис. 5, а, 5, д), что подтверждает работоспособность разработанного датчика крутящего момента.

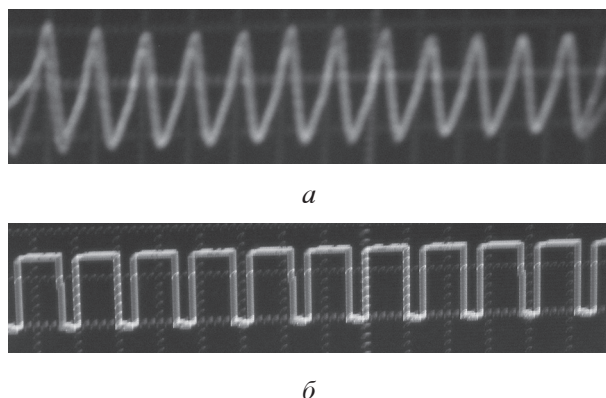


Рис. 8. Осциллограммы изменения напряжения в цепях разработанного датчика крутящего момента

Результаты и обсуждение

Предложенная методика проектирования датчика крутящего момента позволяет выбрать его параметры с учетом величины передаваемого валами трансмиссии момента. Напряжение на выходе датчика момента $U_{\text{вых}}$ пропорционально (с учетом передаточного отношения коробки передач) моменту на валу двигателя трактора и может быть использовано для управления топливоподачей. Особенно это актуально для современных тракторных двигателей с электронными системами управления подачей топлива, так как информация с датчика момента может служить основой для создания автоматизированных систем управления топливоподачей.

Выводы

Разработана методика проектирования и расчета датчика крутящего момента, работа которого основана на измерении угла закручивания упругого вала. Выполнены примеры расчетов.

Литература

1. Герашенко В.В., Коваленко Н.А., Лобах В.П. Методы и средства диагностирования и повышения эксплуатационных свойств автомобилей и их агрегатов. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. 170 с.
2. Герашенко В.В. Стенд для определения статической характеристики датчика крутящего момента // Тракторы и сельхозмашины. 2007. № 12. С. 40–41.
3. Сазонов И.С., Герашенко В.В., Коваленко Н.А., Лобах В.П. Стенд для диагностирования автомобиля по его колесной мощности: патент № 21727 РБ, МПК G 01M 15/00; опублик. 30.04. 2018.

References

1. Gerashchenko V.V., Kovalenko N.A., Laubach V.P. Methods and means of diagnosing and improving the performance of vehicles and their components. Mogilev: Belarus.–Grown. UN-t, 2017. 170 p.
2. Gerashchenko V.V. Stand for determining the static characteristics of the torque sensor / V. Gerashchenko // Tractors and agricultural machinery. 2007. № 12, pp. 40–41.
3. Patent No. 21727 RB, IPC G 01M 15/00. Stand for diagnosis of the car by its wheel power / I.S. Sazonov, V.V. Gerashchenko, N.A. Kovalenko, V.P. Laubach. Publ. 30.04. 2018.