

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЖЕННОСТИ СИСТЕМ ПОДРЕССОРИВАНИЯ БЫСТРОХОДНЫХ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

SPECIALIZED MEASUREMENT SYSTEM FOR EXPERIMENTAL RESEARCH OF SUSPENSION SYSTEM LOADING CONDITIONS OF A HIGH MOBILITY TRACKED VEHICLES

Д.А. ДУБИН
О.А. НАКАЗНОЙ, д.т.н.
Д.А. ЧИЖОВ, к.т.н.
А.Ю. ШМАКОВ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия,
dubin.connect@mail.ru

D.A. DUBIN
O.A. NAKAZNOI, DSc in Engineering
D.A. CHIZHOV, PhD in Engineering
A.YU. SHMAKOV, PhD in Engineering

N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow,
Russia, dubin.connect@mail.ru

Нагруженность систем поддресоривания как состояние, обусловленное внешними воздействиями и условиями функционирования, для быстроходных гусеничных машин определяется характеристиками профиля пути и режимами движения. Наиболее достоверная оценка эксплуатационных параметров нагружения деталей и узлов подвесок получается экспериментальным путем с применением специализированной измерительной аппаратуры. В рамках проведенных исследований по определению кинематических и силовых параметров нагружения элементов системы поддресоривания гусеничной машины массой 14 тонн при движении по лесным грунтовым дорогам разработана измерительная система, реализующая оценку характеристик нагруженности по угловому положению подвесок относительно корпуса машины. Измерительная система состоит из аппаратной и программной подсистем и осуществляет запись углов закрутки торсионных валов в функции времени с последующим преобразованием и статистической обработкой полученных данных в характеристики нагружения упругих элементов и рычагов подвесок. По полученным выборочным данным программная подсистема производит расчет средней долговечности торсионных валов с целью определения наиболее нагруженных подвесок. Преимущество разработки заключается в относительной простоте и универсальности. Аппаратная подсистема и оснастка крепления датчиковой аппаратуры не требуют внесения изменений в конструкцию ходовой части и позволяют проводить исследования на большинстве типов гусеничных машин. Программная подсистема может быть адаптирована под исследования нагруженности гусеничных машин различной весовой категории. Надежность испытательного оборудования, а также устойчивость формирования и регистрации измерительных сигналов оценивалась в рамках полигонных испытаний при движении гусеничной машины в сложных дорожных условиях по трассам протяженностью 350 км.

Ключевые слова: гусеничные машины, измерительная система, подвеска, кинематические параметры.

Loading of cushioning systems, as a condition caused by external influences and operating conditions, for high-speed tracked vehicles is determined by the characteristics of the track profile and motion modes. The most reliable estimate of the operational parameters of loading of parts and suspension assemblies is obtained experimentally using specialized measuring equipment. Within the conducted investigations for determining of kinematic and force parameters of loading of the elements of the cushioning system of a 14-ton tracked vehicle while driving on forest ground roads, a measuring system has been developed that realizes estimation of the loading characteristics by the angular position of the suspensions relative to the vehicle body. The measuring system consists of the hardware and software subsystems and records angles of twisting of torsion shafts as a function of time, with subsequent conversion and statistical processing of obtained data into the loading characteristics of elastic elements and suspension arms. According to received sample data, the software subsystem calculates average durability of torsion shafts in order to determine the most loaded suspensions. The advantage of the study is in relative simplicity and versatility. The hardware subsystem and rigging of the sensor equipment attachment do not require making changes in the construction of the undercarriage and allows to carry out investigations on most types of tracked vehicles. The software subsystem can be adapted for studies of loading of tracked machines of different weight categories. Reliability of the test equipment, as well as stability of formation and recording of measuring signals, was evaluated in polygon tests during motion of a tracked vehicle in difficult road conditions along 350 km tracks.

Keywords: tracked vehicles, measurement system, suspension, kinematic parameters.

ложенной нагрузки закручивается на угол φ , тем самым преобразуя часть кинетической энергии поддрессоренного корпуса в потенциальную энергию упругой деформации торсионного вала. Основанная зависимость, описывающая упругую характеристику подвески (рис. 2), выражается действующей со стороны опорной поверхности и приведенной к оси опорного катка силой P в зависимости от хода подвески f .

Оба параметра могут быть выражены через один общий – угол закрутки торсионного вала φ . Таким образом, ход подвески f относительно статического положения можно описать следующей зависимостью:

$$f = R_0 [\cos \beta_{ст} - \cos(\beta_{ст} + \varphi)], \quad (1)$$

где R_0 – радиус балансира, $\beta_{ст}$ – статическое угловое положение балансира.

В свою очередь уровень нагрузки P , требуемой для перемещения катка на величину f в функции от угла φ , может быть выражен следующим образом:

$$P = \frac{G I_p}{L_T} [(\beta_{ст} - \beta_0) + \varphi] \frac{1}{R_0 \sin(\beta_{ст} + \varphi)}, \quad (2)$$

где G – модуль упругости второго рода материала торсиона, I_p – полярный момент инерции торсионного вала, L_T – длина торсионного вала, β_0 – угловое положение балансира при нулевой закрутке торсиона.

Угловое положение балансира при нулевой закрутке торсиона β_0 и статическое угловое положение балансира $\beta_{ст}$, входящие в зависимости (1) и (2), являются постоянными величинами и могут быть выражены через основные геометрические и физические характеристики элементов подвесок [2]:

$$\beta_{ст} = \arccos \left(\frac{H_{кл} + H - h_{тис} - R_{ок}}{R_0} \right),$$

где $H_{кл}$ – клиренс машины; H – расстояние от оси торсиона до днища корпуса машины; $h_{тис}$ – толщина трака гусеницы; $R_{ок}$ – радиус опорного катка.

$$\beta_0 = \beta_{ст} - \frac{P_{ст} R_0 \sin \beta_{ст} L_T}{G I_p},$$

где $P_{ст}$ – нагрузка на опорный каток в статическом положении подвески.

На основании приведенных зависимостей показано, что получение информации о кинематических и силовых параметрах нагруже-

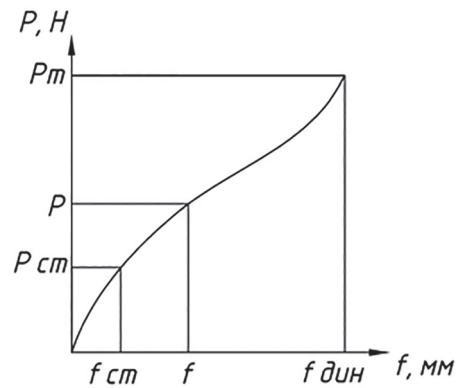


Рис. 2. Общий вид упругой характеристики торсионной подвески

ния элементов систем поддрессоривания может быть реализовано путем записи изменения углов закручивания упругих элементов подвесок – торсионных валов.

Требования, предъявляемые к измерительной системе

Разработанная ИС как совокупность функционально объединенных средств измерений и вычислительных компонентов имеет блочно-модульную структуру, состоящую из технической (аппаратной) и программной (алгоритмической) подсистем.

Анализ специфики экспериментального исследования нагруженности элементов системы поддрессоривания, проводимого в рамках полигонных испытаний гусеничных машин, позволил сформулировать ряд основных требований, которым должны удовлетворять перечисленные подсистемы:

- многоканальность;
- высокая надежность и помехоустойчивость в различных условиях эксплуатации;
- программная и техническая адаптивность для разных типов гусеничных машин.

Многоканальность. Нагрузки, действующие на элементы системы поддрессоривания при движении гусеничной машины, являются функцией режимов движения и профиля поверхности дорожного пути. При движении гусеничных машин по грунтовым непрофилированным дорогам или по бездорожью профиль пути под гусеницами может существенно различаться [3], что приводит к различию в уровнях нагружения, а также распределению нагрузок по подвескам левого и правого бортов. Следовательно, для получения достоверной оценки о процессе нагружения ИС должна реализовывать парал-

тельную регистрацию и обработку сигналов с каждой подвески (рис. 3). Для фиксации скоростных режимов движения в схему необходимо включать дополнительный канал для снятия сигнала с датчика, установленного на ведущем колесе или бортовой передаче.

Высокая надежность и помехоустойчивость в различных условиях эксплуатации. Адекватность экспериментально полученных данных о процессе нагружения систем поддрессоривания, особенно при движении в условиях бездорожья, напрямую зависит от надежной и устойчивой фиксации измерительных сигналов. Необходимо исключить ударные и снизить вибрационные нагрузки на датчиковую аппаратуру, а также минимизировать наводимые помехи со стороны корпуса машины и установленного электрооборудования на электрические сигналы, передающиеся от измерительных компонентов (датчиков) до регистрирующей и вычислительной аппаратуры.

Программная и техническая адаптивность для разных типов гусеничных машин. Требование унификации обусловлено использованием ИС при проведении исследований на машинах разной весовой категории. При этом, конструкция элементов, входящих в состав системы поддрессоривания, различна, следовательно, уровни нагружения при одинаковых значениях кинематических параметров будут разными, тем самым требуя настройки программной подсистемы под конкретный образец гусеничной машины.

Аппаратная и программная подсистемы

Разработанная ИС производит косвенные измерения углов закрутки торсионных валов за счет прямых измерений перепада уровня напряжений в электрической цепи (рис. 4). В качестве датчиков углового положения целесообразно использовать регулируемые делители электрического напряжения – потенциометры (резисторы переменного сопротивления). Для измерения скорости движения гусеничной машины в состав схемы подключается штатный тахогенератор. Полученные в процессе движения ГМ аналоговые измерительные сигналы преобразуются в двоичный цифровой код с последующей обработкой на ЭВМ. Запись входного сигнала может осуществляться непрерывно, объем получаемой информации ограничивается емкостью жесткого диска. В схеме используются элементы питания, что позволяет не подключаться к бортовой сети машины.

Программная подсистема реализует преобразование исходного измерительного сигнала, поступающего с АЦП в кинематические и силовые параметры нагружения, в функции времени. По разработанному алгоритму проводится анализ статистических характеристик исследуемых параметров и определяется распределение нагруженности по подвескам по критерию наименьшей расчетной долговечности торсионных валов от действия полученных эксплуатационных спектров нагружения (рис. 5). Адаптация под исследование гусенич-

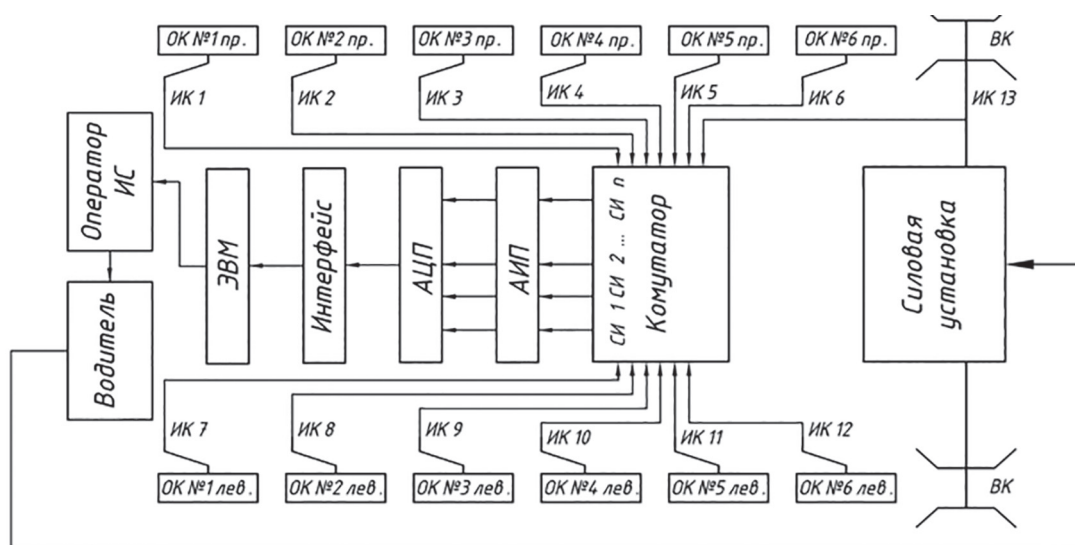


Рис. 3. Структурная схема ИС:

ОК – опорный каток; ИК – измерительный канал; АИП – аналогово-измерительный преобразователь; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ВК – ведущее колесо

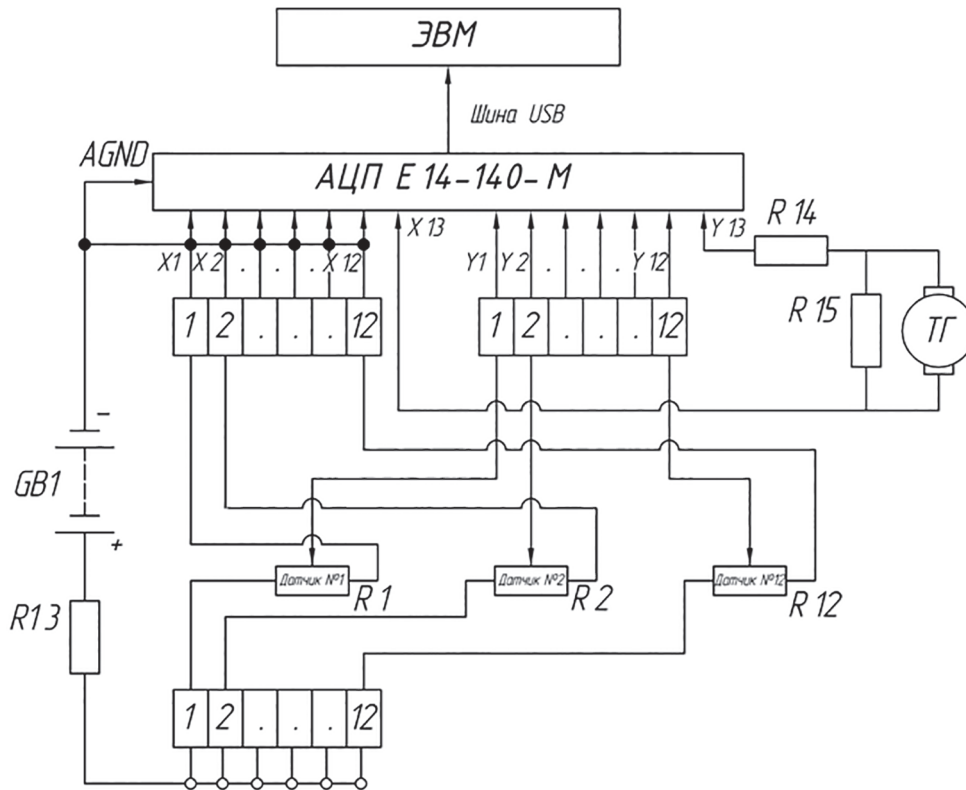


Рис. 4. Электрическая схема аппаратной подсистемы ИС

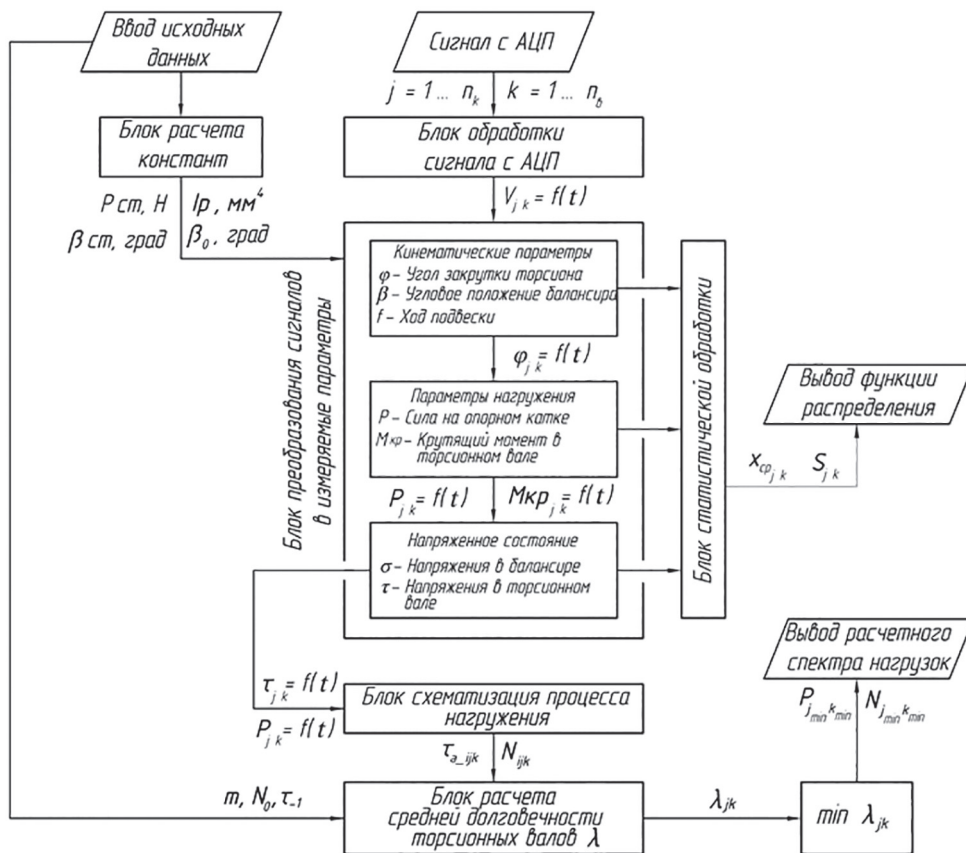


Рис. 5. Алгоритм функционирования программной подсистемы

ных машин различной весовой категории осуществляется за счет ввода соответствующих исходных данных о геометрических характеристиках элементов системы поддрессоривания.

Для каждой выборки проводится схематизация процесса нагружения, в результате которого случайный процесс нагружения исследуемых подвесок заменяется эквивалентным упорядоченным, т.е. выявляется спектр амплитуд касательных напряжений торсионных валов, характерный для исследуемых условий эксплуатации гусеничной машины. Схематизация осуществляется по методу максимумов [4], где за амплитуду нагружения принимают:

$$\tau_{a_ijk} = \tau_{\max_ijk} - \tau_{\text{ср}_jk},$$

где τ_{\max_ijk} – максимальное значение касательного напряжения в торсионном вале i -м цикле нагружения, полученное по j -му измерительному каналу (№ подвески) для k -й выборки; $\tau_{\text{ср}_jk}$ – медиана экстремумов касательных напряжений по всему процессу нагружения для данного измерительного канала и данной выборки.

При этом учитывается, что характеристики сопротивления усталости для различных материалов и сплавов, как правило, получаются при испытании лабораторных образцов при симметричном цикле нагружения. Приведение асимметричных циклов нагружения к эквивалентным симметричным осуществлялось с использованием следующих зависимостей:

$$\begin{cases} \tau_{a_ijk} + \gamma \tau_{\text{ср}_jk}, \text{ при } \tau_{m_ijk} > 0; \\ \tau_{a_ijk}, \text{ при } \tau_{m_ijk} < 0, \end{cases}$$

где γ – коэффициент чувствительности материала к асимметрии цикла нагружения; τ_{m_ijk} – среднее значение напряжения в i -ом цикле нагружения.

Средняя долговечность торсионных валов определяется в соответствии с методикой, изложенной в работе В.П. Когаева [5]:

$$\lambda = \frac{a_p \tau_{-1Д}^m N_0}{\sum_i \tau_{ai}^m N_{i6}},$$

где $a_p = 0,1 \dots 1$ – расчетный коэффициент повреждений; $\tau_{-1Д}$ – предел выносливости для детали; m и N_0 – параметры кривой усталости [6]; τ_{ai} – амплитуда цикла нагружения; N_{i6} – количество циклов действия амплитуды τ_{ai} в одном блоке нагружения.

Полученное распределение расчетных долговечностей торсионных валов от действия из-

меряемых нагрузок в конечном итоге позволяет судить о распределении нагруженности по подвескам и сформировать расчетный спектр нагружения.

Блок статистической обработки производит точечные оценки параметров распределения генеральной совокупности измеряемых кинематических и силовых параметров нагружения подвесок, а также определяет максимальные и минимальные значения параметров для каждой выборки. Формирующиеся в результате гистограммы относительных частот позволяют судить о виде функции распределения измеряемых величин для каждой подвески.

Практическая реализация измерительной системы

Разработанный комплекс в опытном исполнении применялся в ходе исследований по определению кинематических и силовых параметров нагружения гусеничной машины массой 14 т при движении по лесным грунтовым дорогам [7]. Компонентная схема испытательной машины соответствовала переднему расположению моторно-трансмиссионного отделения. Тип системы поддрессоривания – индивидуальная торсионная с шестью опорными катками на каждый борт и демпфирующими элементами телескопического типа, расположенными на первой, второй и шестой подвесках.

Оснастка крепления датчиков представляла собой кронштейн из листового металла, установленный на корпусе машины при помощи эпоксидного клея. Передача угла поворота упругого элемента подвески осуществлялась через гибкую муфту, что позволяло компенсировать несоосность установки вала датчика с осью торсионного вала и минимизировать вибрационные воздействия на измерительные компоненты (рис. 6).

В собранной схеме использовались потенциометры R-24N1-B10K фирмы SONG HUEI с номинальным сопротивлением 10 кОм (рис. 7). Угол поворота валика составляет 300°, рабочая температура по данным производителя находится в диапазоне от минус 10 до плюс 70 °С.

Подавление помех от внешней среды и электрооборудования осуществлялось путем соединения резисторов с электрической схемой при помощи многожильного экранированного провода FTP-4ST (витая пара), а также за счет использования дифференци-

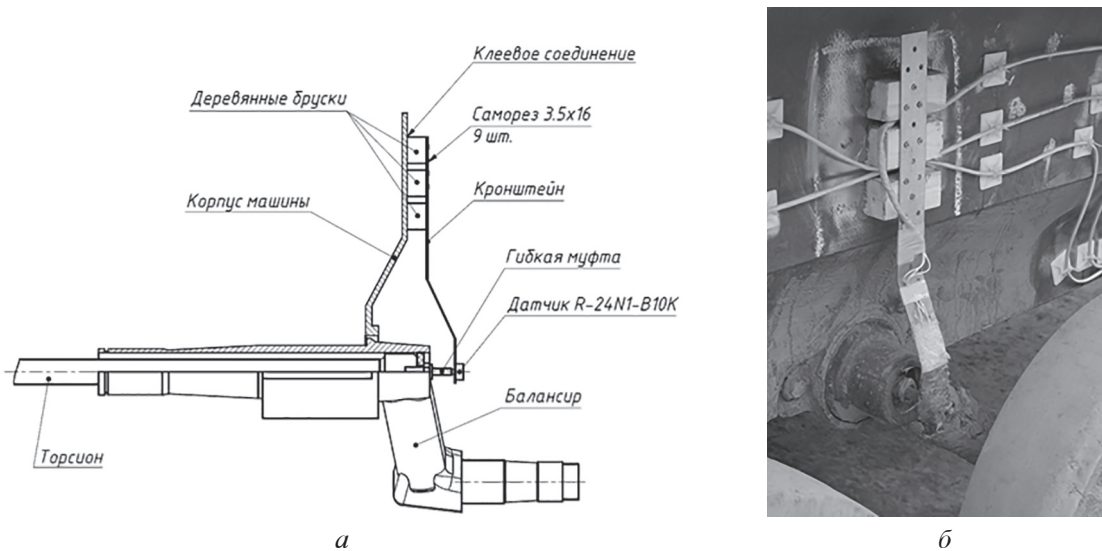


Рис. 6. Установка датчиковой аппаратуры на корпусе машины:
 а – схема крепления; б – опытный образец

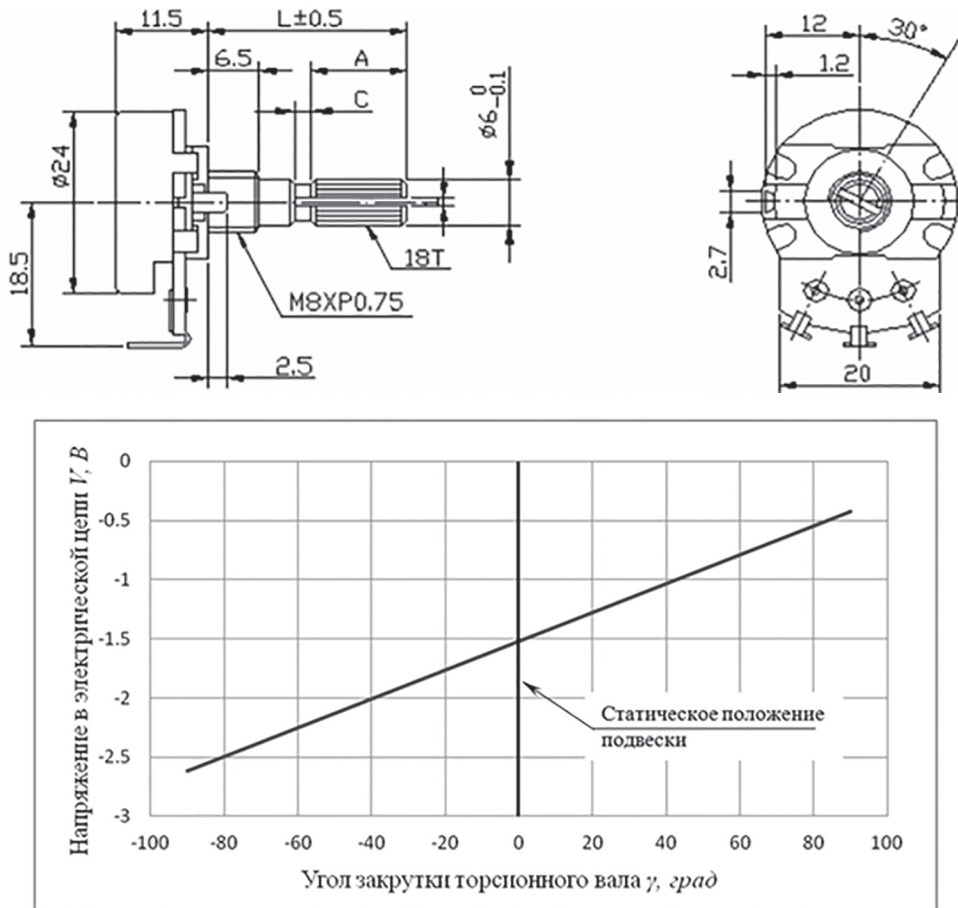


Рис. 7. Характеристики применяемых датчиков

альной схемы подключения измерительной аппаратуры к АЦП. Кабельная трасса укладывалась вдоль корпуса машины с выводом в обитаемое отделение. В целях предотвращения возможного механического повреждения осуществлялось армирование кабельной

трассы в области амортизаторов и днища корпуса. В качестве источника питания датчиковой аппаратуры использовалась батарейка «Крона» с номинальным напряжением 9В. Для преобразования аналоговых сигналов в цифровой код применялся аналогово-циф-

ровой преобразователь Е14-140М. Используемый АЦП имеет в своей схеме входной коммутатор и усилитель сигналов, которые позволяют реализовать измерения по 16 дифференциальным каналам. Полученные значения напряжений в электрической цепи преобразовывались в углы закрутки торсионного вала ϕ в соответствии с данными, получен-

ными при тарировке датчиков. Начальному (нулевому) угловому положению вала соответствовал угол закрутки торсиона в статическом положении подвески.

В результате записи и последовательного преобразования исходного измерительного сигнала формировались осциллограммы процесса нагружения подвесок (рис. 8).

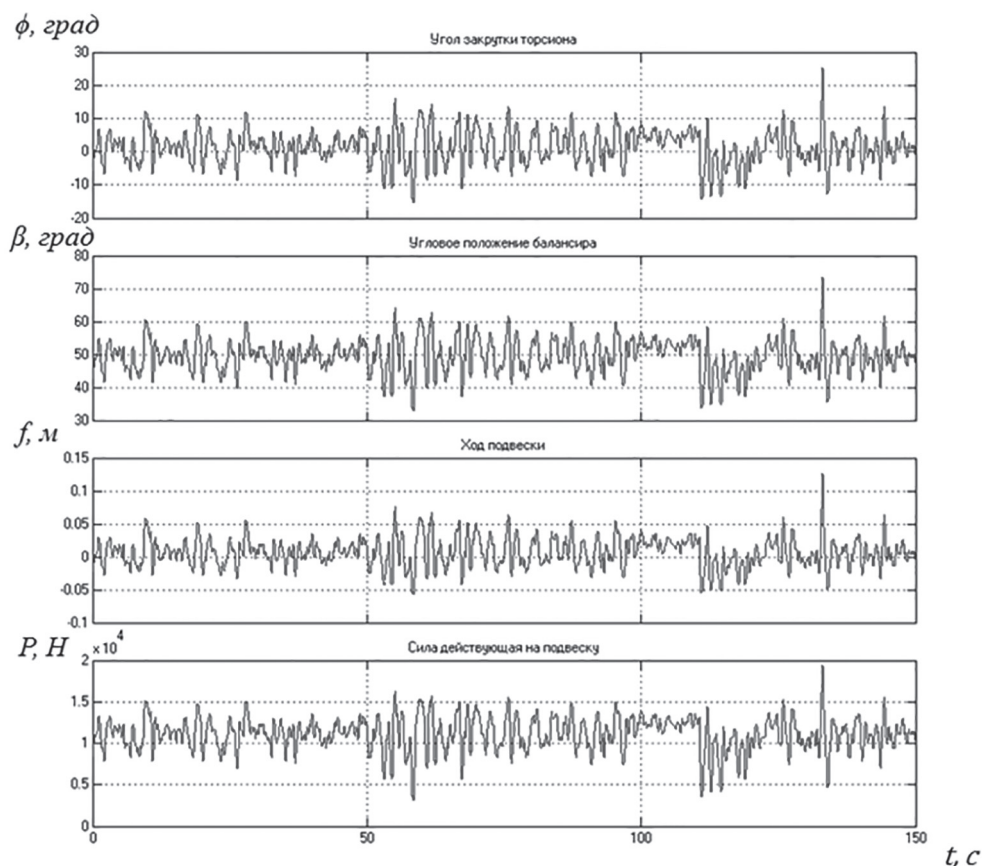


Рис. 8. Запись процесса нагружения подвески



a



б

Рис. 9. Дорожно-грунтовые условия при проведении эксперимента:

a – испытания в лесной местности в условиях бездорожья; *б* – движение по песчаному грунту

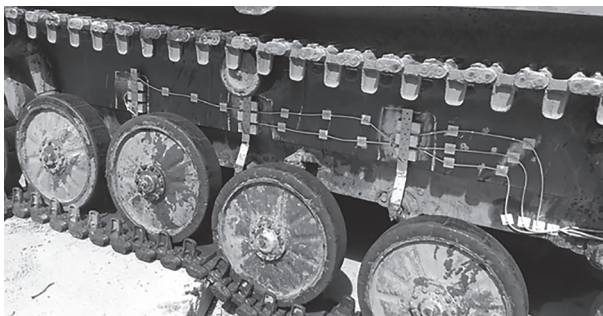


Рис. 10. Преодоление препятствий (бетонные плиты)

Тестирование измерительной системы проводилось в течении трех суточных маршей. Проверка устойчивости регистрации сигнала осуществлялась на протяжении 50 км пробега по размытым лесным дорогам, а также по песчаному грунту (рис. 9). Надежность крепления и целостность испытательной оснастки под действием вибрационных нагрузок оценивалась на протяжении 350 км при движении на максимально реализуемых по управляемости скоростных режимах, а также при преодолении различных препятствий, таких как стволы деревьев, бетонные плиты и глубокие канавы (рис. 10).

Выводы

Разработанные измерительная система и конструкция испытательной оснастки подтвердили свою работоспособность, в том числе в тяжелых условиях бездорожья.

Регистрирующая аппаратура устойчиво фиксирует электрический сигнал с датчиков в различных дорожных условиях, что позволяет с требуемой точностью оценивать кинематические и силовые параметры нагружения элементов системы поддрессоривания гусеничных машин.

Аппаратная подсистема и оснастка крепления датчиковой аппаратуры не требуют внесения изменений в конструкцию ходовой части и позволяют проводить исследования на большинстве типов гусеничных машин. Программная подсистема может быть адаптирована под исследования нагруженности гусеничных машин различной весовой категории.

Литература

1. Раннев Г.Г. Измерительные информационные системы. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 336 с.
2. Дядченко М.Г., Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Конструкция и расчет подвесок быстроходных гусеничных машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 38 с.

3. Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Комплексное поддрессоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 184 с.
4. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статического представления результатов. М.: Издательство стандартов, 1983. 15 с.
5. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.
6. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. М.: Издательство стандартов, 1982. 85 с.
7. Дубин Д.А., Наказной О.А., Смирнов И.А., Шлеев А.Н. Экспериментальное определение кинематических и силовых параметров нагружения элементов системы поддрессоривания быстроходной гусеничной машины // Труды НАМИ. 2016. № 3 (266). С. 45–53.

References

1. Rannev G.G. Izmeritel'nye informatsionnye sistemy [Measurement information systems]. Moscow, Akademiya Publ., 2010. 336 p.
2. Dyadchenko M.G., Kotiev G.O., Sarach E.B. Konstruktsiya i raschet podvesok bystrokhodnykh gusenichnykh mashin [The design and calculation of suspension system of highly mobile track vehicles]. Moscow, MSTU by N.E. Bauman Publ., 2007. 38 p.
3. Kotiev G.O., Sarach E.B. Kompleksnoe podressorivanie vysokopodvizhnykh dvukhzvennykh gusenichnykh mashin [Integrated suspension systems of highly mobile articulated tracked vehicles]. Moscow, MSTU by N.E. Bauman Publ., 2010. 184 p.
4. GOST 25.101-83. Strength calculations and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results. Moscow, Standartinform Publ., 1983. 15 p.
5. Kogaev V.P. Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh peremennykh vo vremeni [Strength calculations under variable alternating stresses] Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 232 p.
6. GOST 25.504-82 Strength calculation and testing. Method of fatigue strength calculation behavior. Moscow, Standartinform Publ., 1982. 85 p.
7. Dubin D.A., Nakaznoi O.A., Smirnov I.A., Shleev A.N. Experimental determination of kinematic and power parameters of loading the suspension system elements of a high mobility tracked machine. Trudy NAMI. 2016. No. 3 (266), pp. 45-53 (in Russ.).