

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

д.т.н. Горобцов А.С., д.т.н. Ляшенко М.В., к.т.н. Соколов-Добрев Н.С.,
д.т.н. Шеховцов В.В., к.т.н. Потапов П.В., Клементьев Е.В., Долотов А.А.
Волгоградский государственный технический университет,
(8442) 24-81-61, ts@vstu.ru

Приведено описание конструкции созданного в Волгоградском государственном техническом университете многофункционального испытательного стенда для определения основных эксплуатационных характеристик трансмиссий легковых и грузовых автомобилей, описание его математической модели, созданной на основе пространственной динамической схемы, и результаты расчетного определения массо-инерционных параметров элементов стенда. Подвижными массами модели являются массы вращающихся элементов трансмиссии, передающих крутящий момент, корпуса трансмиссии, рамы стенда, состоящей из двух подрамников, двух хабов нагружающего устройства DinaPack, включающих в себя гидромашины. Значения моментов инерции деталей и жесткости их соединений получены с помощью программного комплекса DASP и системы 3D автоматизированного проектирования SolidWorks. Для осуществления возможностей моделирования различных режимов нагружения и прогнозирования их результатов без проведения длительных натурных испытаний на первом этапе на основе структурной схемы стенда создана его плоская динамическая модель, которая, кроме сведений о составе и связи масс, содержит данные об упругих, инерционных и диссипативных параметрах ее элементов. На следующем этапе разработана пространственная структурная схема стенда, на основе которой в среде «Универсальный механизм» создана его пространственная динамическая модель. Динамическая модель стенда включает в себя 31 инерционную массу, на которые действуют линейные, контактные, биполярные и специальные силы. Для проверки адекватности созданной модели на начальном этапе выполнен расчет собственных частот колебаний ее масс в диапазоне от 0 до 10000 Гц. Сравнение их значений с результатами обработки экспериментальных цифровых осциллограмм колебаний масс стенда показало достаточную для решения инженерных задач сходимость результатов.

Ключевые слова: испытательный стенд, испытания трансмиссий, анализ вибронгруженности, виброизмерительная аппаратура.

Введение

На кафедре «Транспортные машины и двигатели» ВолгГТУ для определения основных эксплуатационных характеристик трансмиссий автомобилей создан многофункциональный испытательный стенд [1–3]. Общее устройство стенда показано на рис. 1.

Цель исследования

Целью исследования является разработка математической модели оригинального многофункционального испытательного стенда для определения основных эксплуатационных характеристик трансмиссий легковых и грузовых.

Математическая модель стенда

Для осуществления возможностей моделирования [4–9] различных режимов нагружения и прогнозирования их результатов без

проведения длительных натурных испытаний на первом этапе на основе структурной схемы стенда (рис. 2а) создана его плоская динамическая модель (рис. 2б), которая, кроме сведений о составе и связи масс, содержит данные об

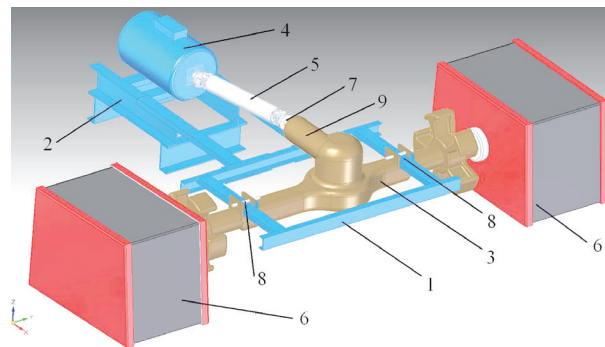


Рис. 1. Общее устройство стенда:

1, 2 – рамы, 3 – испытуемый мост, 4 – приводной электродвигатель, 5 – карданный вал, 6 – нагружающие устройства, 7 – фланец, 8 – кронштейны, 9 – корпус межосевого дифференциала

упругих, инерционных и диссипативных параметрах ее элементов. На следующем этапе разработана пространственная структурная схема стенда (рис. 3), на основе которой в среде «Универсальный механизм» создана его пространственная динамическая модель (рис. 4).

Модель включает в себя 31 инерционную массу; на массы действуют линейные, контактные, биполярные и специальные силы (рис. 4). Подвижными массами модели являются массы вращающихся элементов трансмиссии, переда-

ющих крутящий момент (массы 1–25), корпуса трансмиссии (масса 26), рамы стенда, состоящей из двух подрамников (массы 27, 28), двух хабов нагружающего устройства DinaPack (массы 29 и 30), включающих в себя гидромашины (массы 30, 31).

Значения моментов инерции деталей и жесткости их соединений, полученные с помощью программного комплекса DASP и системы 3D автоматизированного проектирования SolidWorks [4, 6, 7, 8], приведены в табл. 1 и 2.

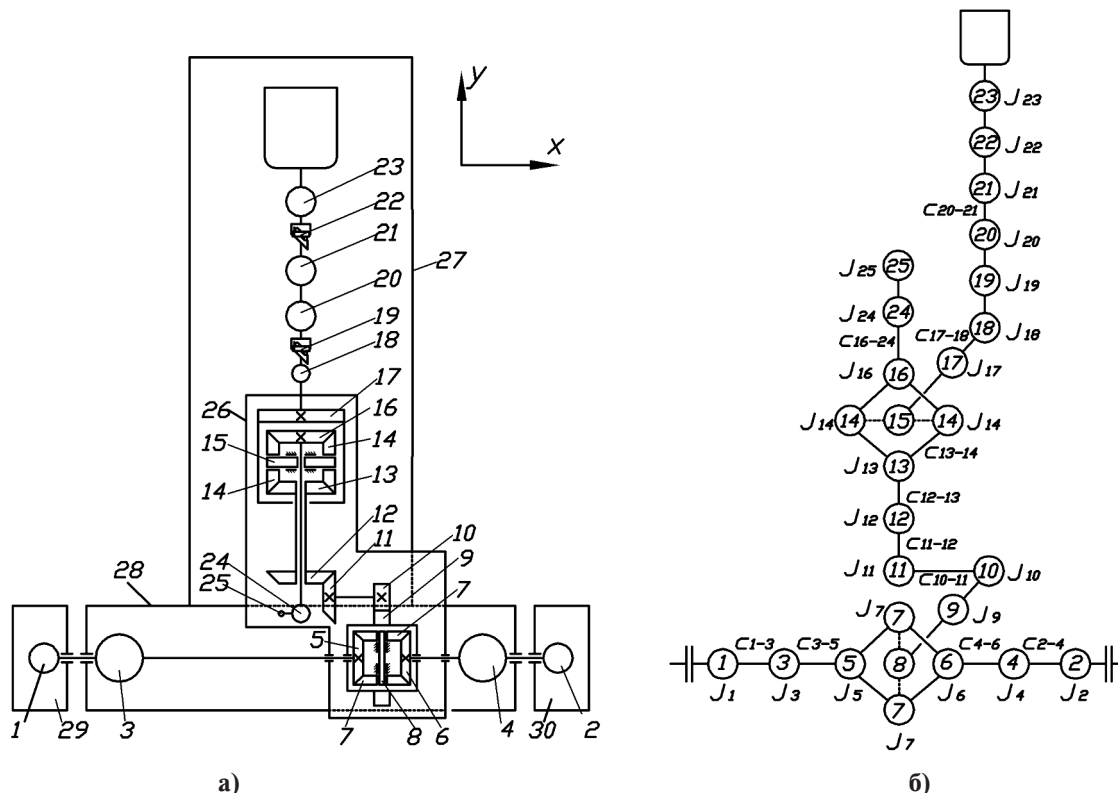


Рис. 2. а – структурная схема стенда, б – динамическая модель его силовой передачи

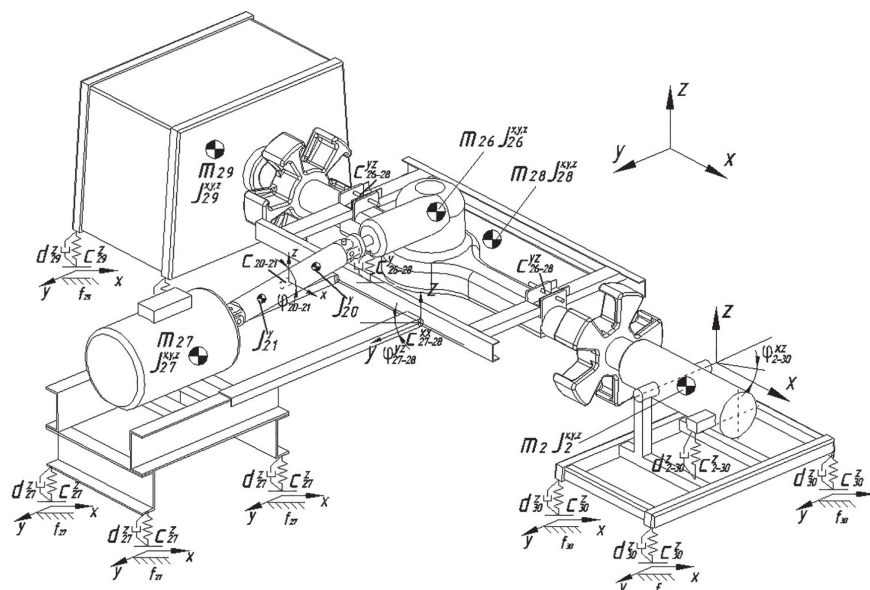


Рис. 3. Трехмерная структурная схема стенда

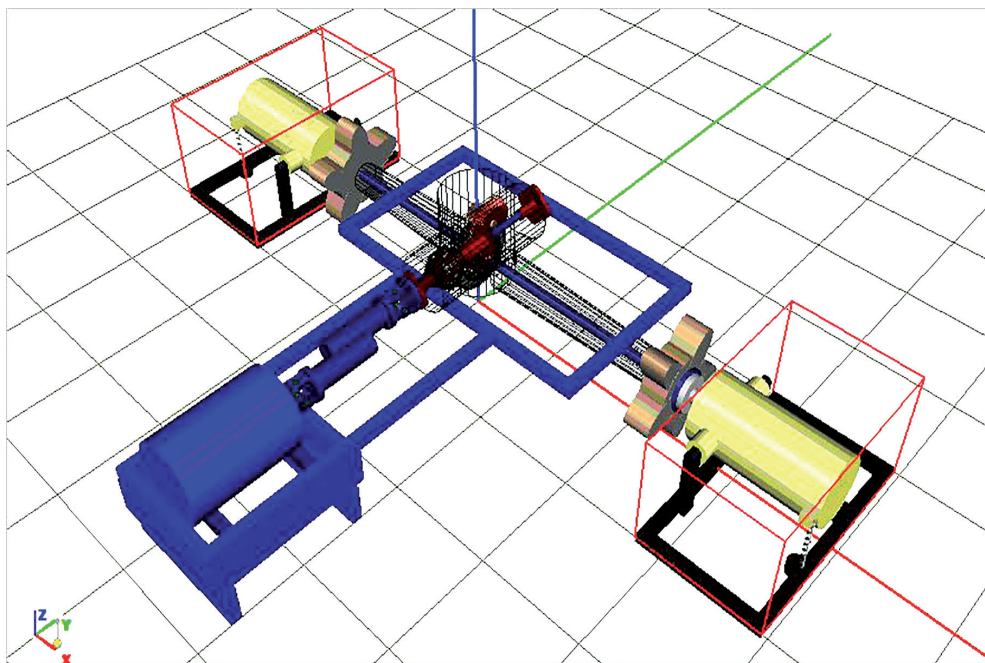


Рис. 4. Динамическая модель стенда в программном пакете «Универсальный механизм»

Таблица 1

Упругие и диссипативные характеристики элементов стенда

№ уч-ка	Приведенные к участку жесткости элементов	Линейная жесткость элемента $\times 10^6$ Н/м			Угловая жесткость элемента $\times 10^6$ Н*м/рад		
		C_x	C_y	C_z	C_{xx}	C_{yy}	C_{zz}
1–3, 2–4	2 вала, 1 шлиц. соедин.	—	—	—	0,573749	—	—
3–5	1 вал, 1 шлиц. соедин.	—	—	—	0,459650	—	—
4–6	1 вал, 1 шлиц. соедин.	—	—	—	0,57737	—	—
5–7, 6–7	4 зубч. зацепления	291,75	—	—	—	—	—
9–10	1 зубч. зацепление	—	329,662	—	—	—	—
10–11	1 вал, 1 шпон. соедин.	—	—	—	0,36309	—	—
11–12	1 зубч. зацепление	—	47,842	—	—	—	—
12–13	4 вала, 1 шлиц. соедин.	—	—	—	0,83878	—	—
13–14	4 зубч. зацепления	—	22,158	—	—	—	—
14–16	4 зубч. зацепления	—	22,158	—	—	—	—
16–24	1 вал, 2 шлиц. соедин.	—	—	—	—	0,0270	—
24–25	1 ступица	—	—	—	—	—	—
17–18	1 вал	—	—	—	—	1,0299	—
20–21	2 вала	—	0,65598	—	—	—	—
27–г	Резин. виброизолят.	—	—	2,60416	—	—	—
27–28	Хомут	—	—	—	—	—	—
26–28	Хомут	—	—	—	—	—	—
29–г	Резин. виброизолят.	—	—	5,20833	—	—	—
30–г	Резин. виброизолят.	—	—	5,20833	—	—	—

Таблица 2

Массо-инерционные параметры элементов стенда

№ массы	Наименование элемента	Момент инерции, кгм ²			Масса, кг
		J_x	J_y	J_z	m
1, 2	Тормозной механизм стенда Dīnapack и переходная ступица	<u>0,42547</u>	1,46696	1,41717	36,9
3	Ступица 5320-3103015-02 и половина полуоси 5320-2403071	<u>0,51152</u>	0,60070	0,60070	<u>37,39</u>
4	Ступица 5320-3103015-02 и половина полуоси 5320-2403070	<u>0,50134</u>	0,34901	0,34901	<u>35,19</u>
5	Полуосевая шестерня 53205-2403050 и половина полуоси 5320-2403071	<u>0,00789</u>	0,46767	0,46767	<u>12,77</u>
6	Полуосевая шестерня 53205-2403050 и половина полуоси 5320-2403070	<u>0,00669</u>	0,39641	0,39641	<u>10,57</u>
7	Сателлит межколесного дифференциала 53212-2403054	<u>0,0004</u>	0,00023	0,00023	<u>0,488</u>
8	Крестовина дифференциала	<u>0,00949</u>	0,00494	0,00494	<u>2,78</u>
9	Колесо ведомое 5320-2402120-10 и две чашки дифференциала 53205-2403018	<u>0,62530</u>	0,428	0,428	<u>43,69</u>
10	Шестерня цилиндрическая ведущая 5320-2402110-10	<u>0,00441</u>	0,01112	0,01112	<u>6,695</u>
11	Колесо коническое ведомое 5320-2402060	<u>0,05319</u>	0,03413	0,03413	<u>14,72</u>
12	Шестерня ведущая коническая 5320-2502017	0,03032	<u>0,00591</u>	0,03032	<u>5,62</u>
13	Шестерня привода среднего моста 5320-2402017	0,00210	<u>0,00329</u>	0,00210	<u>4,05</u>
14	Сателлит межосевого дифференциала 53212-2506054	0,00001	<u>0,00011</u>	0,00001	<u>0,19</u>
15	Крестовина межосевого дифференциала 5320-2506060	0,00062	<u>0,00114</u>	0,00062	<u>0,705</u>
16	Шестерня 5320-2506130 и половина вала промежуточного моста 5320-2502201	0,05308	<u>0,00181</u>	0,05308	<u>4,685</u>
17	Две чашки межосевого дифференциала 5320-2506018, 5320-2506019	0,08296	<u>0,04114</u>	0,08296	<u>15,68</u>
18	Фланец первичного вала 5320-2506037	0,00657	<u>0,00515</u>	0,00657	<u>2,000</u>
19, 22	Крестовина карданной передачи 5320-2201025-02	0,00095	<u>0,00180</u>	0,00095	<u>1,4</u>
20	Половина карданного вала 5320-2205011	0,20842	<u>0,02614</u>	0,21174	<u>17,05</u>
21	Половина карданного вала 5320-2205011	0,20842	<u>0,02614</u>	0,21174	<u>17,05</u>
23	Фланец вала электродвигателя	0,02065	<u>0,02518</u>	0,01447	<u>7,4</u>
24	Фланец заднего моста и ведущий вал	0,06426	<u>0,01224</u>	0,06426	<u>6,96</u>
26	Картер моста 5320-2501010	1,59	38,097	38,278	<u>127,6</u>
27	Передняя рама стенда	6,82	1,45	8,26	<u>24,83</u>
28	Задняя рама стенда	3,19	7,52	10,704	<u>27,07</u>
29, 30	Корпус хаба DīnaPack без гидромашины	4,69	9,37	10,21	<u>88,32</u>
31	Электродвигатель и рама	12,68	8,51	12,01	<u>186,7</u>

Подчеркнутыми являются те массо-инерционные значения, которые используются при расчете крутильных колебаний

Заключение

Для проверки адекватности созданной модели на начальном этапе выполнен расчет

собственных частот колебаний ее масс в диапазоне от 0 до 10000 Гц. Сравнение их значений с результатами обработки экспериментальных цифровых осциллограмм колебаний масс стенда (рис. 5) показало достаточную для решения инженерных задач сходимость результатов.

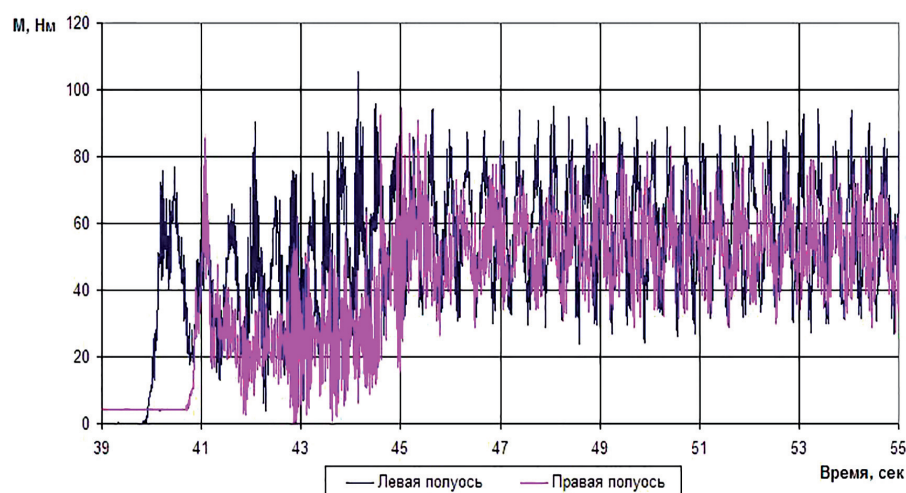


Рис. 5. Пример осциллограммы колебаний момента на левой и правой полуосях при частоте вращения вала электродвигателя 1000 мин⁻¹

Литература

1. Шеховцов В.В., Ходес И.В., Шевчук Вл.П., Соколов-Добрев Н.С., Шеховцов К.В., Клементьев Е.В. Стендовое оборудование для испытаний силовых передач тракторов // Современные наукоёмкие технологии. 2013. № 1. С. 36–40.
2. Горобцов А.С., Долотов А.А., Клементьев Е.В., Ляшенко М.В., Потапов П.В., Шеховцов В.В. Испытательный стенд для исследования условий работы механизмов ведущего моста грузового автомобиля // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 11. Волгоград, 2015. № 5 (165). С. 10–13.
3. Горобцов А.С., Ляшенко М.В., Соколов-Добрев Н.С., Шеховцов В.В., Потапов П.В., Клементьев Е.В., Долотов А.А. Исследование виброактивности элементов заднего моста грузового автомобиля // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 10: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. Волгоград, 2015. № 4 (162). С. 8–11.
4. Шеховцов В.В., Ляшенко М.В., Соколов-Добрев Н.С., Долгов К.О. Моделирование динамических процессов в узлах автотранспортных средств с использованием пакета визуального моделирования Matlab/Simulink: учеб. пособ.(гриф). Доп. УМО вузов РФ по образованию в области транспортных машин и транспортно-технологических комплексов – Волгоград, ВолгГТУ. 2013. 147 с.
5. Шеховцов В.В., Ходес И.В., Соколов-Добрев Н.С., Шеховцов К.В. Формирование динамических характеристик силовой передачи стенда для испытания трансмиссий // Техника машиностроения. 2012. № 1. С. 42–49.
6. Соколов-Добрев Н.С., Шеховцов В.В., Иванов И.А., Ляшенко М.В. Динамическая модель силовой передачи гусеничного сельскохозяйственно-

го трактора тягового класса 6 // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 3. Межвуз. сб. науч. ст. / Волгоград, ВолгГТУ. 2010. № 10. С. 92–96.

7. Ляшенко М.В., Шеховцов В.В., Дейниченко Е.М., Соколов-Добрев Н.С. Методы исследования динамических процессов в узлах силовых передач и системах поддрессирования гусеничных сельскохозяйственных тракторов: учеб. пособ. (гриф). Допущено УМО вузов РФ по образованию в области транспортных машин и транспортно-технологических комплексов – Волгоград, ВолгГТУ. 2009. 150 с.
8. Dynamic Model with Reaction Nodes of Tracked Agricultural Tractor / Z.A. Godzajew, M.V. Lyashenko, V.V. Shekhovtsov, Vl.P. Shevchuk, N.S. Sokolov-Dobrev, B. Michalowski // Journal of KONES Powertrain and Transport. 2007. Vol. 14, No.4, pp. 101–112.
9. Тескер Е.И., Шеховцов В.В., Салолыкин М.Ф. Анализ динамических моделей, характеризующих нагруженность силовых элементов трансмиссий // Наука, техника и высшее образование: проблемы и тенденции развития: сб. науч. тр. / Ростовский филиал Моск. гос. ун-та технол. и управл. Ростов н/Д, 2006. С. 13–17.

References

1. V.V. Shekhovtsov, I.V. Khodes, Vl.P. Shevchuk, N.S. Sokolov-Dobrev, K.V. Shekhovtsov, E.V. Klement'ev. Test bench for testing power transmissions of tractors. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies]. 2013, No 1, pp. 36–40 (in Russ.).
2. A.S. Gorobtsov, A.A. Dolotov, E.V. Klement'ev, M.V. Lyashenko, P.V. Potapov, V.V. Shek-

- hoytsov. Test bench for investigation of the truck driving axle operation conditions. *Izvestiya VolgGTU. Ser. Nazemnye transportnye sistemy* [Izvestia VSTU]. Vyp. 11. Volgograd, 2015, No 5 (165), pp. 10–13 (in Russ.).
3. A.S. Gorobtsov, M.V. Lyashenko, N.S. Sokolov-Dobrev, V.V. Shekhovtsov, P.V. Potapov, E.V. Klement'ev, A.A. Dolotov. Study of vibro-activity of elements of the truck rear axle. *Izvestiya VolgGTU. Ser. Nazemnye transportnye sistemy* [Izvestia VSTU]. Vyp. 10. Mezhevuz. sb. nauch. st. VolgGTU. Volgograd, 2015, No 4 (162), pp. 8–11 (in Russ.).
 4. V.V. Shekhovtsov, M.V. Lyashenko, N.S. Sokolov-Dobrev, K.O. Dolgov. *Modelirovanie dinamicheskikh protsessov v uzlakh avtotransportnykh sredstv s ispol'zovaniem paketa vizual'nogo modelirovaniya Matlab/Simulink* [Simulation of dynamic processes in assemblies of vehicles using visual modeling package Matlab/Simulink]. Ucheb. posob.(grif). Dop. UMO vuzov RF po obrazovaniyu v oblasti transportnykh mashin i transportno-tekhnologicheskikh kompleksov. VolgGTU Publ. Volgograd, 2013, 147 p.
 5. V.V. Shekhovtsov, I.V. Khodes, N.S. Sokolov-Dobrev, K.V. Shekhovtsov. The formation of dynamic characteristics of powertrain test bench for transmissions. *Tekhnika mashinostroeniya*. 2012, No 1, pp. 42–49 (in Russ.).
 6. N.S. Sokolov-Dobrev, V.V. Shekhovtsov, I.A. Ivanov, M.V. Lyashenko. Dynamic model of powertrain of caterpillar farm tractor of 6 drawbar category. *Izvestiya VolgGTU. Ser. Nazemnye transportnye sistemy* [Izvestia VSTU]. Vyp. 3. Mezhevuz. sb. nauch. st. VolgGTU. Volgograd, 2010, No 10, pp. 92–96 (in Russ.).
 7. M.V. Lyashenko, V.V. Shekhovtsov, E.M. Deynichenko, N.S. Sokolov-Dobrev. *Metody issledovaniya dinamicheskikh protsessov v uzlakh silovykh peredach i sistemakh podressorivaniya gusenichnykh sel'skokhozyaystvennykh traktorov* [Methods of study of dynamic processes in assemblies of powertrains and suspension systems of caterpillar farm tractors]. Ucheb. posob. (grif). Dopushcheno UMO vuzov RF po obrazovaniyu v oblasti transportnykh mashin i transportno-tekhnologicheskikh kompleksov. VolgGTU Publ. Volgograd, 2009, 150 p.
 8. Z.A. Godzajew, M.V. Lyashenko, V.V. Shekhovtsov, V.I. Shevchuk, N.S. Sokolov-Dobrev, B. Michalowski. Dynamic Model with Reaction Nodes of Tracked Agricultural Tractor. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2007. Vol. 14, No.4, pp. 101–112 (in Pol.).
 9. E.I. Tesker, V.V. Shekhovtsov, M.F. Salolykin. Analysis of dynamic models that characterize the loading of the power transmission elements. *Nauka, tekhnika i vysshee obrazovanie. Problemy i tendentsii razvitiya*. Cb. nauch. tr. Rostovskiy filial Mosk. gos. un-ta tekhnol. i upravl. i dr. Rostov n/D, 2006, pp. 13–17 (in Russ.).

MATHEMATICAL MODEL OF TEST BENCH

Dr.Eng. **A. S. Gorobtsov**, Dr.Eng. **M. V. Lyashenko**, Ph.D. **N. S. Sokolov-Dobrev**,
Dr.Eng. **V. V. Shekhovtsov**, Ph.D. **P. V. Potapov**, **E. V. Klementyev**, **A. A. Dolotov**
Volgograd State Technical University
+7 8442 24-81-61, ts@vstu.ru

The description of multifunctional test bench construction to determine the basic operational characteristics of transmissions of automobiles and trucks designed in Volgograd State Technical University is provided. The description of its mathematical model created on the basis of the spatial dynamic schema is given and the results of calculation of test bench mass and inertia parameters are provided. The models of moving masses are the masses of transmission rotating elements, which transmit torque, transmission housing, test bench frame, that consists of two subframes, two hubs, DinaPack loading device, including a hydraulic machine. The values of parts inertia moments and stiffness of its joints are obtained by DASP software package and SolidWorks 3D CAD system. On the first stage to carry out the simulation capabilities at various loading conditions and forecast their results without a long-term field tests, on the basis of the structural scheme of test bench the flat dynamic model was created, which besides the data on composition and communication of the masses, contains data on elastic, inertial and dissipative parameters of its elements. On the next stage the spatial structural test bench scheme was created, on the basis of which in "Universal mechanism" program the spatial dynamic model was made. The dynamic model of test bench includes 31 inertial masses influenced by linear, contact, bipolar and special forces. To check the adequacy of the created model at the initial stage the calculation of fundamental frequencies of its masses in the range from 0 to 10000 Hz was made. The comparison of its values with the results of processing of experimental digital oscillograms of test bench masses oscillations showed sufficient for the solution of engineering problems convergence of results.

Keywords: test bench, transmissions tests, analysis of loads vibration, vibration measuring instrument