

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.113

А.С. Вашурин, Ю.П. Трусов, Л.Н. Орлов, В. Ю. Шурыгин

### РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ АУТРИГЕРА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОПОКИДЫВАНИЯ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

При проведении работ по адаптации систем электронной курсовой устойчивости, которые позволяют существенно снизить количество ДТП, на территории специальных закрытых полигонов выполняются различные специальные маневры, нормируемые различными документами. При выполнении этих экстремальных маневров возникает риск опрокидывания транспортного средства. Для снижения вероятности опрокидывания перед испытаниями на автомобилях устанавливаются специальные боковые опоры - аутригеры. В работе проанализированы требования, предъявляемые к данным конструкциям, а также документация по существующим вариантам изделий данного типа. На основании полученной информации была разработана оригинальная конструкция аутригера с использованием современных пакетов прочностного анализа, основанных на методе конечных элементов с возможностью проведения топологической оптимизации модели. На основании полученных результатов с учетом технологических возможностей была разработана конструкторская документация и изготовлен опытный образец. Учитывая назначение изделия, перед установкой на автомобиль все экземпляры необходимо проверять на соответствие заявленным прочностным требованиям, для этого был разработан, изготовлен и аттестован аккредитованной испытательной лабораторией испытательный стенд.

*Ключевые слова:* аутригер, испытания, электронные системы контроля устойчивости, ЭКУ, метод конечных элементов, МКЭ, LCV, прочность, оптимизация, нагрузка, стенд.

Благодаря техническому прогрессу в мире постоянно снижается количество пострадавших в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП), в России с 2007 г. также наблюдается устойчивая тенденция к сокращению числа аварий. Однако потери от ДТП остаются весьма существенными. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в результате дорожно-транспортных происшествий на нашей планете ежегодно погибает более 1 млн человек и более 2 млн человек получают ранения, в 2016 в Российской Федерации погибло более 20 000 человек и более 220 000 получили ранения. Многие исследования подтверждают, что электронные системы контроля устойчивости (ЭКУ) позволяют предотвратить значительное число аварий, связанных с потерей устойчивости и управляемости транспортного средства (например, при разгоне на сыром асфальте или крутом повороте) помогают предотвратить занос, опрокидывание и обеспечить движение именно по той траектории, которую задал водитель. Такие требования давно установлены в США и странах Евросоюза, а с 2018 года станут обязательными и для стран Таможенного союза, в том числе для России.

Проведение работ по доводке и адаптации систем ЭКУ на автомобилях, выполняемые на территории специальных закрытых полигонов, требует выполнения специальных упражнений: испытание на маневр по усеченной синусоиде (sine with dwell), J-образный разворот (J-turn NHTSA), испытание типа "рыболовный крючок" ("fish hook") и другие регламентированных различными документами - согласно правил ЕЭК ООН №13Н-00, глобальных технических правил №8 [1], Federal Motor Vehicle Safety Standart (FMVSS) №126 [2]. При вы-

полнении таких экстремальных маневров, особенно на начальных этапах работ, возникает риск опрокидывания транспортного средства и связанная с этим опасность травмирования водителя-испытателя и повреждения испытательного оборудования. Для предотвращения опрокидывания на испытываемые автомобили устанавливаются специальные боковые опоры - аутригеры. При движении автомобиля в штатных режимах, когда все колеса автомобиля имеют контакт с опорной поверхностью, аутригеры не должны взаимодействовать с ней. Касание элементов аутригера с опорной поверхностью должно происходить только после отрыва колес автомобиля от опорной поверхности и возникновения угрозы опрокидывания.

Кроме основных требований к прочности и жесткости конструкции, гарантированному предотвращению переворота автомобиля, также предъявляются требования по минимальной массе, минимизации влияния на характеристики испытываемого автомобиля и возможности монтажа на широкую гамму моделей. В результате исследований, проведенных NHTSA [3], предлагаются три варианта бамперных аутригеров: из алюминиевого сплава, титанового сплава и из композитного материала (карбона). В работах приведены расчетные нагрузки, действующие на аутригер в вертикальном и продольном направлениях, равные соответственно 17400 и 5400 Н. В работах показаны результаты расчета предлагаемой конструкции на прочность с принятыми нагрузками. Приведены чертежи на типоразмерный ряд аутригеров для различных классов автомобилей. Аутригеры представляют собой консольную балку, крепящуюся к несущей системе автомобиля, и опору, выполненную в виде или колеса, или полусферы выполненной из антифрикционного материала. Достоинствами данной конструкции являются низкая масса и соответствие требованиям нормативных документов (так как требования были установлены по результатам выполнения данных НИОКР по созданию аутригеров). Сечение балки аутригеров – тавровое. К недостаткам данной конструкции следует отнести: высокую стоимость и низкую технологичность изготовления - аутригер фрезеруется из целого титанового профиля квадратного сечения; сложность (или невозможность) установки на транспортные средства несъемным бампером и на транспортные средства, у которых «юбка» кузова расположена ниже силовых элементов несущей системы.

В более ранних работах NHTSA по оценке устойчивости и управляемости автомобилей использовались центральные аутригеры «Effects of Outrigger Design on Vehicle Dynamics» [4], в которых продольную нагрузку воспринимает натянутый стальной трос.

Для грузовых автомобилей с прицепами NHTSA предлагает конструкцию складных регулируемых аутригеров «National Highway Traffic Safety Administration's Class 8 Tractor/Trailer Safety Outriggers» [3]. Определенный интерес представляет механизм складывания и конструкция опоры, выполненной в виде колеса из антифрикционного полимерного материала.

В работе «Subjective and objective evaluation of an outrigger construction's effect on rollover» [3] предлагается две схемы центральных аутригеров: с одной опорой на каждой стороне и двумя опорами. Также в работе приведены коэффициенты трения используемых в опорах антифрикционных материалов и методика их определения.

В работе «Stability Control Validation for Customised Utility Vehicles» [5] приведена конструкция аутригеров для легких коммерческих автомобилей и результаты работ по ее доводке. Предлагаемая конструкция устанавливается вблизи центра масс автомобиля. Важными в данной работе являются два момента: первый – неудачный пример применения в качестве опоры колеса с пневматической шиной и переход на конструкцию с опорой, выполненной из антифрикционного материала; второй – нагрузка, используемая для прочностных расчетов, равная 7500Н. Недостатки предлагаемой конструкции: расчет на восприятие только вертикальной (весовой) нагрузки, воздействие продольной (фрикционной) нагрузки, возникающей в точке контакта опоры с дорожным покрытием, не учитывается; значительное превышение возникающих в конструкции напряжений предела текучести, характерного для конструкционных низколегированных сталей.

### Определение коэффициента трения слайдеров аутригеров с поверхностью

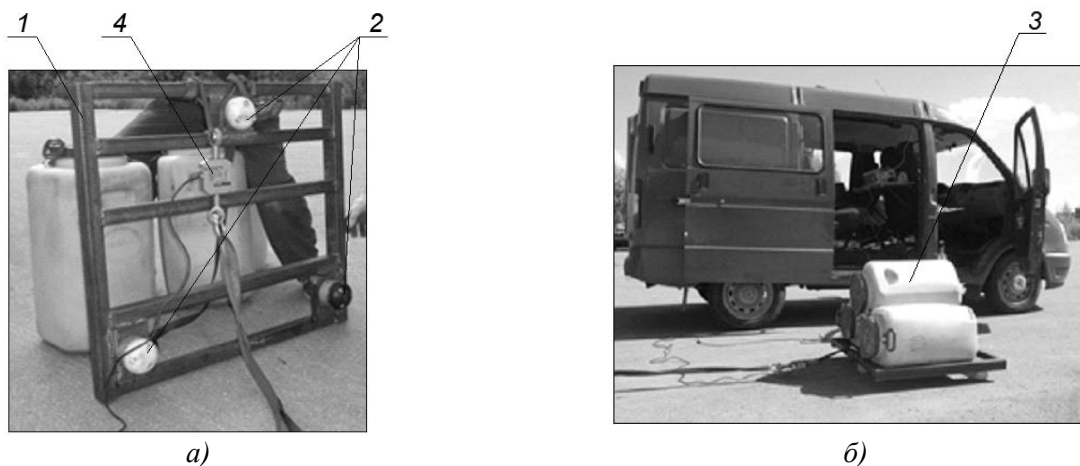
Для задания режимов нагружения балки аутригера, необходимых для грамотного задания параметров оптимизации, важным вопросом является определения коэффициента трения слайдеров аутригеров с поверхностью дороги. От этого коэффициента во многом зависит продольная нагрузка, которую будет воспринимать аутригер при опоре на него в критической ситуации, возникающей в процессе выполнения упражнения, предписанного нормативными документами. Поэтому перед разработкой непосредственно конструкции аутригера были проведены испытания по оценке коэффициента трения образца опорной площадки аутригера с опорной поверхностью (дорогой) испытательного полигона.

Очевидно, что при касании в зоне контакта слайдера с дорогой, помимо нормальной реакции возникает и поперечное усилие, обусловленное силой трения, определяемое по формуле:

$$F_{\text{поп}} = F_{\text{тр}} = \mu \cdot N, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения;  $N$  – нормальная реакция в пятне контакта.

Оценка коэффициента трения скольжения  $\mu$  слайдеров производилось опытным путем волочения каркасной конструкции 1 (рис. 1), опорами которой служили элементы, выполненные из материала, из которого предполагалось выполнять опорную площадку аутригера (слайдеры) 2. Каркасная конструкция с балластом 3 волочилась по опорной поверхности полигона путем буксировки ремнями, соединенными с динамометром 4, позволяющим фиксировать, возникающие в сцепке усилия, равные силам трения.



**Рис. 1. Установка для определения коэффициента трения скольжения слайдеров аутригеров:**  
 а – в процессе замены модификаций слайдеров; б – в рабочем положении

Испытания проводились в с различной массой балласта. Таким образом, используя формулу, обратную формуле (4), определялся коэффициент трения  $\mu$ :

$$\mu = \frac{F_{\text{сц}}}{N_{\text{сумм}}}, \quad (2)$$

где  $F_{\text{сц}}$  – усилия, возникающие в сцепке,  $N_{\text{сумм}}$  – суммарная нормальная реакция в пятнах контакта слайдеров.

В результате испытания получены следующие значения покоя  $\mu = 0,729$ , скольжения  $\mu = 0,457$ .

Полученные значения показывают, что при выборе схемы аутригера с неподвижной опорной площадкой продольная нагрузка может достигать почти половины значения вертикальной нагрузки. Если на дорожном покрытии испытательного полигона имеются дефекты, то нагрузка может существенно возрасть.

### Разработка конструкции и изготовление аутригера

Для работы была выбрана «бамперная» схема аутригеров – две балки, прикрепленные к передней и задней частям автомобиля. Принцип их действия таков: при потере автомобилем устойчивости и стремлении опрокинуться слайдеры входят в контакт с опорной поверхностью, предотвращая дальнейший поворот кузова транспортного средства относительно продольной оси. В этой связи при проектировании аутригеров важно принимать в расчет угол опрокидывания транспортного средства так, чтобы не препятствовать естественным безопасным колебаниям кузова, и в то же время препятствовать опрокидыванию на наиболее ранней стадии. Значение угла опрокидывания автомобиля определяет высоту позиционирования контактных слайдеров аутригера, минимальное значение которой определится по формуле:

$$H = \tan(\alpha) \cdot L, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол опрокидывания,  $L$  – расстояние между слайдерами аутригеров и осью крена при опрокидывании транспортного средства (рис. 2).

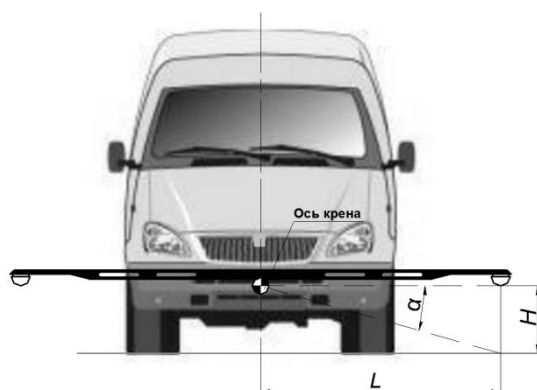


Рис. 2. Схема определения высоты расположения слайдеров аутригеров

На практике определение точного расположения оси, вокруг которой происходит опрокидывание транспортного средства, является весьма трудоемкой задачей по причине того, что ее расположение зависит от конструктивных особенностей подвески, марки шин, положения центра тяжести, которое может меняться в зависимости от величины и способа загрузки автомобиля. Поэтому крепление аутригеров, как правило, делают регулируемым по высоте.

На основании полученных экспериментальных значений коэффициента трения опорной площадки о дорожное полотно испытательного полигона было принято решение, что опора должна быть выполнена в виде колеса из антифрикционного полимерного материала. На основании конструкторской документации объектов испытаний, на которые планируется устанавливать аутригеры, была определена их допустимая область проектирования (рис. 3). Разрабатываемые аутригеры предназначены для установки на легкие коммерческие автомобили (LCV).

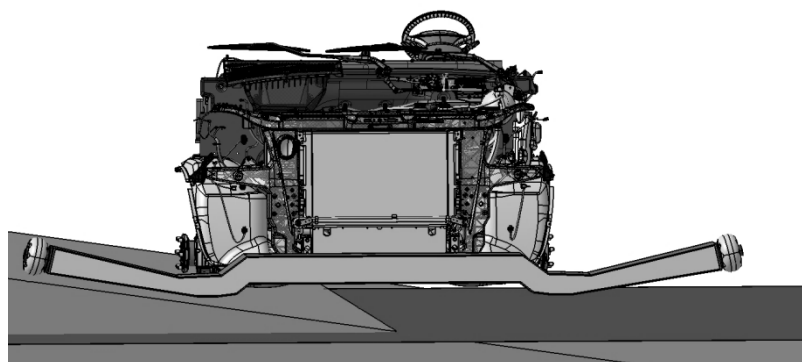
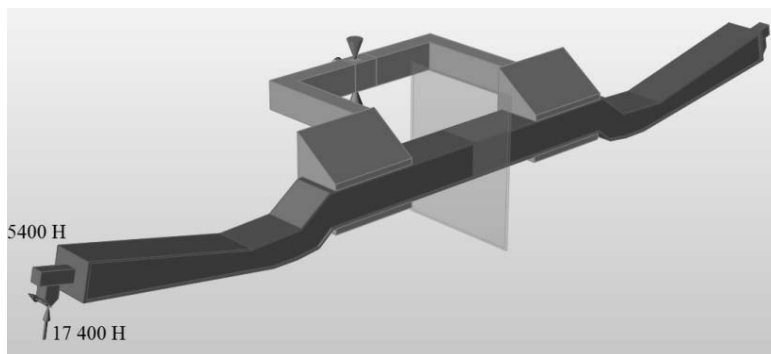


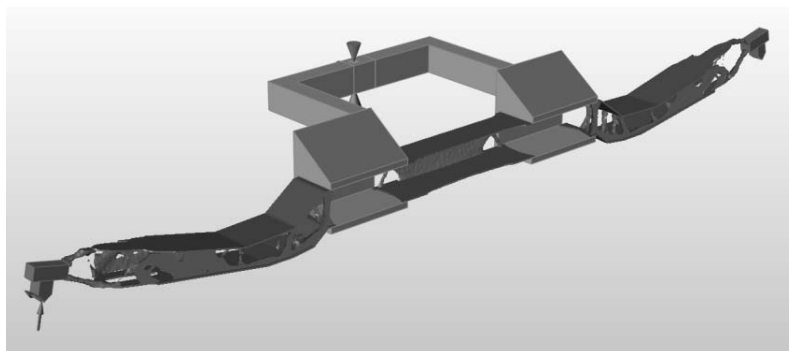
Рис. 3. Предварительная форма аутригера

Используя современные расчетные пакеты, основанные на методе конечных элементов (МКЭ) и позволяющие проводить топологическую оптимизацию конструкции, была разработана конструкция аутригера. Расчетная схема с указанием мест нагружения приведена на рис. 4. Прикладываемые усилия были взяты из отчетов исследований, проводимых NHTSA [3]. Необходимо отметить, что для воспроизведения реального режима нагружения закрепление аутригера производилось через имитатор рамы.



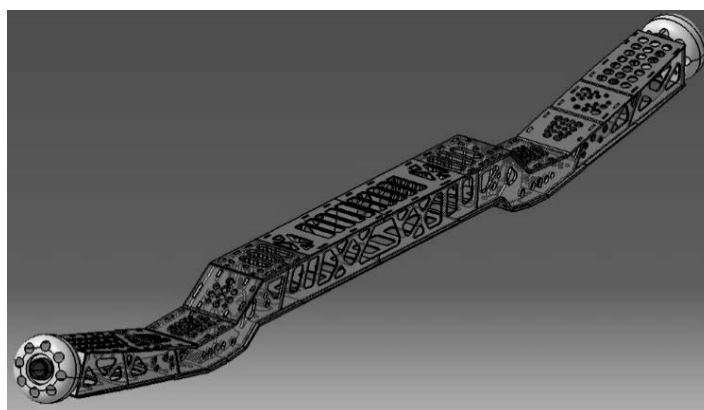
**Рис. 4.** Расчетная схема аутригера

По результатам работы была получена «идеальная» модель аутригера, приведенная на рис. 5.



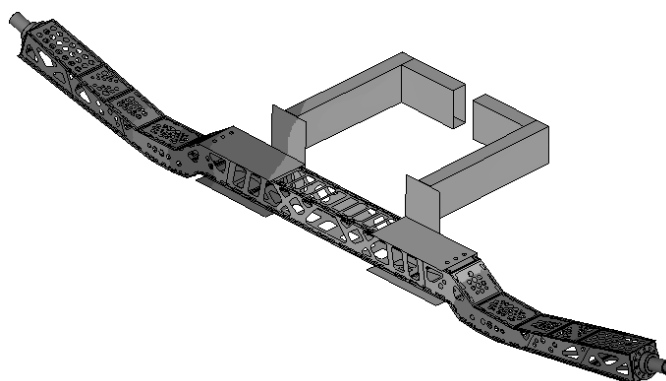
**Рис. 5.** «Идеальная» модель аутригера

На основании «идеальной» модели была разработана реальная конструкция, учитывающая производственно-технологические возможности, номенклатуру материалов и изменение прочностных параметров материалов в районе сварного шва. Модель аутригера приведена на рис. 6. Конструкция представляет собой сварную балку коробчатого сечения, переменного по длине. Детали аутригера выполнены из листов различной толщины - 2, 4, 5 и 8 мм.



**Рис. 6.** Модель аутригера

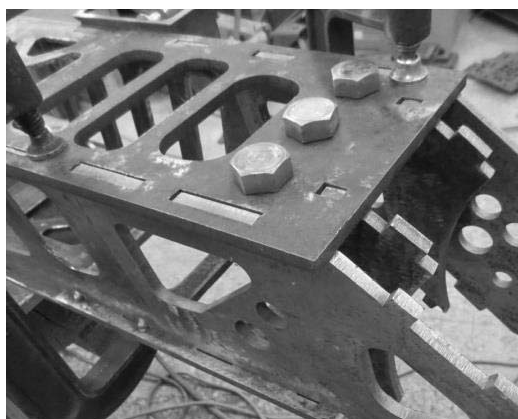
Разработанная конструкция была рассчитана на прочность в современных пакетах программ, основанных на МКЭ с учетом физической и геометрической нелинейности.



**Рис. 7. Деформированное состояние конструкции**

Полученные результаты расчетов подтвердили (рис. 7), возможность восприятия данной конструкцией нагрузки приведенной в документах NHTSA [3].

Положительные результаты расчетов позволили реализовать конструкцию аутригера в металле. Для облегчения сборки деталей в единую конструкцию была применена замковая система шип-паз с уникальными для данного положения размерами. Фрагмент изготовления аутригера показан на рис. 8.



**Рис. 8. Изготовление аутригера**

## Испытание аутригера

Аутригеры устанавливаются на транспортные средства для предотвращения их опрокидывания при выполнении различных экстремальных маневров на территории закрытых полигонов при оценке и доводке управляемости автомобиля и проведении работ по адаптации систем ЭКУ на автомобилях. Аутригеры страхуют автомобиль от опрокидывания и связанных с ним таких негативных последствий, как травмирование людей и повреждение объекта испытаний при потере испытателем контроля над автомобилем. Поэтому для каждого аутригера необходимо провести приемочные испытания перед установкой на транспортное средство.

Для проведения испытаний коллективом авторов был разработан и изготовлен специальный стенд [7]. Данный стенд содержит станину, регулируемое по высоте относительно нее коромысло, на которое специальными зажимами крепится аутригер. Также имеется подвижный контейнер с образцом дорожного покрытия, на который опирается слайдер аутригера. Стенд предусматривает также силоизмерительные устройства для регистрации прикладываемых вертикальных усилий и продольной нагрузки, гидроцилиндры для приложения вертикальной и продольной нагрузок, которые подключаются к гидростанции через гидрораспределитель, позволяющий индивидуально регулировать подачу и давление. Внешний вид стенда и фрагмент испытаний показан на рис. 9.

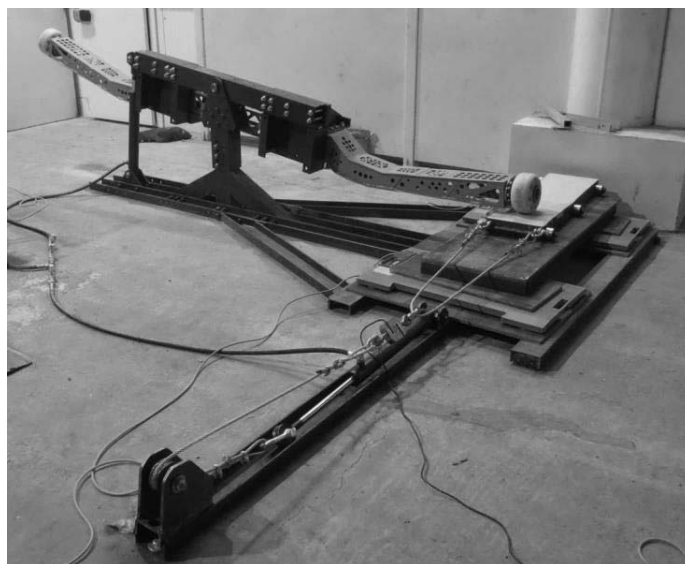


Рис. 9. Стенд для испытаний аутригеров

По результатам испытаний данный образец выдержал более 23000 Н вертикальной нагрузки, при этом регистрируемая продольная нагрузка не превышала 3000 Н.

### Выводы

В ходе выполненной работы была разработана конструкция и изготовлен опытный образец аутригера, имеющий необходимые прочностные характеристики. Для проведения приемочных испытаний был разработан и изготовлен специальный стенд.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0193 от 27.04.2016 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218). Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».*

## Библиографический список

1. Глобальные технические правила № 8 – ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a8r.pdf> (дата обращения: 03.06.17);
2. Федеральные стандарты о безопасности моторных транспортных средств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://icsw.nhtsa.gov/cars/rules/import/FMVSS/> (дата обращения: 03.06.17);
3. Национальное управление безопасностью движения на трассах США [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nhtsa.gov/> (дата обращения: 23.05.17);
4. Сообщество автомобильных инженеров (SAE International) «Effects of Outrigger Design on Vehicle Dynamics» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://papers.sae.org/940226/> (дата обращения: 23.05.17);
5. Технологический университет Luleå (Luleå University of Technology) «Stability Control Validation for Customised Utility Vehicles» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pure.ltu.se/portal/files/104376062/LTU-EX-2015-104186274.pdf> (дата обращения: 23.05.17);
6. **Крясков, В.Г.** Проектирование аутригеров для испытаний устойчивости транспортных средств / В.Г. Крясков, А.С. Вашурин, А.В. Тумасов, А.А. Васильев // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – № 3. – С. 40-47; [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41392> (дата обращения: 12.06.2017).
7. Заявка 2017106759 Российская Федерация, МПК G01M 17/02; G01M 99/00; G01N 3/20. Стенд для испытаний аутригеров / Вашурин А.С., Трусов Ю.П., Мошков П.С., Торопов Е.И.; заявитель НГТУ; – № 2017106759; заявл. 01.03.2017; опубл. 01.03.2017.

*Дата поступления  
в редакцию 22.11.2017*

**A.S. Vashurin, Y.P. Trusov, L.N. Orlov, V.Y. Shurigin**

**DEVELOPMENT OF AN OUTRIGGER DESIGN USED TO PREVENT  
VEHICLE TIPPING DURING TESTING**

Nizhny Novgorod technical state university n.a. R.E. Alekseev

Electronic stability control systems are developed in order to improve stability of vehicles in critical conditions of motion. Mass introduction of such systems helped to significantly decrease number of road accidents. Since each model of vehicle has its own mass characteristics, it is necessary to provide adaptation operations, which are conducted at special testing sites. The testing program is established by legislation and includes number of special maneuvers fulfilment of which involves risks of vehicle tipping. In order to prevent such dangerous cases the vehicle should be equipped with special supports called outriggers.

This paper contains an analysis of existing types of outriggers as well as legislative requirements on them. The analysis results were taken into account during the development of outrigger design. The design process was implemented with the use of modern computer aided design tools providing strength analysis based on finite element method. The software provided a possibility to conduct topological optimization of the model as well. As a result, a prototype and design documentation were obtained and method of further production was evaluated.

Product functionality assumes that every exemplar shall be accredited in accordance with stated strength characteristics. A special test-bench was designed, manufactured and certified for these purposes.

*Key words:* outrigger, testing, electronic stability control systems, ESC, finite element method, FEM, LCV, strength, optimization, loads, test-bench.