

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ
УСТОЙЧИВОСТИ МАЛОТОННАЖНОГО ФУРГОНА
ПРИ КРИВОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИRESULTS OF DYNAMIC SIMULATION OF THE LATERAL STABILITY
OF A LIGHT VAN WHEN CURVILINEAR MOVEMENTНикитин Г.С., Тинт Наинг Вин
Nikitin G.S., Tint Naing WinКалужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана
(Калуга, Россия)

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga, Russia Russian Federation)

Аннотация. В статье приведены результаты разработки методики и реализации динамического моделирования в программной среде SolidWorks Motion 2016 изменения угла крена кузова фургона Газель Next при активном маневрировании и на повороте с использованием рычажно-электромагнитной системы стабилизации в сравнении с рычажной. Была разработана методика динамического моделирования с целью анализа изменения угла крена цельнометаллического фургона ГАЗель NEXT в режиме движения при повороте и интенсивном маневрировании с рычажным стабилизатором и с использованием системы рычажно-электромагнитной стабилизации. В результате исследований было выявлено уменьшение угла крена цельнометаллического фургона Газель Next на режимах движения при активном маневрировании и на поворотах с использованием системы рычажно-электромагнитной стабилизации относительно установленной на примере ГАЗель NEXT - рычажной. Предложенным методом динамического моделирования была доказана эффективность использования рычажно-электромагнитной системы стабилизации при повороте и активном маневрировании, по сравнению со стандартными рычажными стабилизаторами на основе сравнения углов крена первого и второго варианта.

Ключевые слова: поперечная устойчивость, стабилизатор поперечной устойчивости; электромагнитный стабилизатор

Дата принятия к публикации: 21.11.2022
Дата публикации: 10.03.2023

Сведения об авторах:

Никитин Геннадий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Колесные машины и прикладная механика» Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,
e-mail: main.port@inbox.ru

Тинт Наинг Вин – аспирант кафедры «Колесные машины и прикладная механика» Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (на-

Abstract. The article presents the results of developing a methodology and implementing dynamic modeling in the SolidWorks Motion 2016 software environment for changing the body roll angle of the Gazelle Next van during active maneuvering and turning using a lever-electromagnetic stabilization system in comparison with a lever stabilizer system. A dynamic modeling technique was developed to analyze the change in the roll angle of the Gazelle NEXT all-metal van in the driving mode when turning and intensive maneuvering with a lever and using a lever-electromagnetic stabilization system). As a result of the research, a decrease in the roll angle of the Gazelle Next all-metal van was revealed in driving modes with active maneuvering and cornering using the lever-electromagnetic stabilization system relative to that installed on the example of the Gazelle NEXT - lever. The proposed method of dynamic modeling proved the effectiveness of using a lever-electromagnetic stabilization system when turning and active maneuvering, compared with standard lever stabilizers based on a comparison of the roll angles of the first and second options.

Keywords: lateral stability, anti-roll bar; electromagnetic stabilizer.

Date of acceptance for publication: 21.11.2022
Date of publication: 10.03.2023

Authors' information:

Gennady S. Nikitin – Candidate Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Wheeled vehicles and Applied Mechanics” at Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: main.port@inbox.ru

Tint Naing Win – postgraduate, Department “Wheeled vehicles and Applied Mechanics” at Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: tintnaingwin1990@gmail.com

циональный исследовательский университет)»,
e-mail: tintnaingwin1990@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8473-1545

†
†
†
†
ORCID: 0000-0001-8473-1545

1. Введение

Опрокидывание или скольжение скоростных грузовиков является одной из основных форм дорожно-транспортных происшествий. Поперечная устойчивость грузовых автомобилей в процессе интенсивного движения на поворотах и при маневрировании в значительной степени определяет безопасность движения и сохранность жизни человека и груза [1, 2].

Основным недостатком применения обычного рычажного стабилизатора поперечной устойчивости является снижение хода подвески, недостаточная плавность хода и комфортность передвижения. Также рычажный стабилизатор не предполагает применение системы автоматического управления положением кузова на поворотах [3-5].

В последнее время на легковых автомобилях более высокого класса стали применять активные стабилизаторы: электрические и гидравлические, которые обеспечивают более эффективное выравнивание автомобиля на поворотах и при маневрировании [1,4]. Результаты обзора показывают, что электромеханические стабилизаторы отличают более простая конструкция, быстрое время отклика и низкий расход энергии, чем у гидравлических стабилизаторов. Исходя из этого была предложена новая система рычажно-электромагнитной поперечной стабилизации.

Экспериментальная часть исследований была выполнена методом динамического моделирования поперечного крена кузова фургона в программной среде SolidWorks Motion 2016. Была разработана методика динамического моделирования с целью анализа изменения угла крена цельнометаллического фургона ГАЗель NEXT в режиме движения при повороте с рычажным стабилизатором и с использованием системы рычажно-электромагнитной стабилизации. Предложенным методом динамического моделирования был выполнен анализ изменения угла крена кузова цельнометаллического фургона ГАЗель NEXT при интенсивном маневриро-

вании, как с рычажным стабилизатором, так и с использованием рычажно-электромагнитной системы.

Целью данной работы является анализ результатов динамического моделирования поперечного крена кузова фургона в программной среде SolidWorks Motion 2016, по вариантам с использованием рычажно-электромагнитной системы стабилизации в сравнении с рычажным стабилизатором для повышения устойчивости малотоннажного грузового фургона ГАЗель NEXT на поворотах и при маневрировании.

2. Материалы и методики

В результате теоретических исследования была разработана схема электромагнитного стабилизатора, предназначенного для применения в конструкции коммерческих фургонов грузоподъемностью от 1,2 до 3 т. Дополнительные электромагнитные стабилизаторы (рис.1) выполнены в виде низковольтного электромагнита с подвижным сердечником двустороннего рабочего действия. Для усиления стабилизирующего эффекта от опрокидывания был предложен режим совместного действия противоположных электромагнитных стабилизаторов в противофазе. Так, при выталкивании штока со стороны крена выполняется подъем кузова для его выравнивания, и в это время с другой стороны шток электромагнитного стабилизатора вытягивается и опускает кузов, что повышает эффективность выравнивания кузова путем совместного усилия двух электромагнитных стабилизаторов.

Электропитание электромагнитных стабилизаторов обеспечивается от бортовой сети с напряжением 12 В с последующим преобразованием этого значения в 36 В. Базой для установки электромагнитного стабилизатора был выбран цельнометаллический фургон ГАЗель NEXT грузоподъемностью 1,2 т, с полной массой 3,5 т.

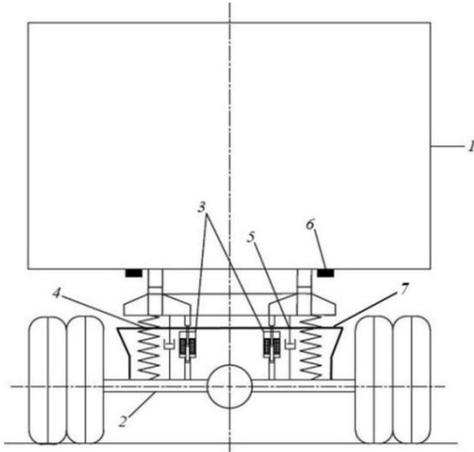


Рис. 1. Общая схема электромагнитного стабилизатора поперечной устойчивости заднего моста (1 – кузов, 2 – мост, 3 – электромагнитный стабилизатор, 4 – подвеска, 5 – амортизатор, 6 – датчик высоты кузова, 7 – рычажный стабилизатор поперечной устойчивости)

Для проверки эффективности выбранной схемы стабилизации была разработана методика динамического моделирования, на основании которой были проведены исследования процесса движения автомобиля с системой рычажно-электромагнитной поперечной стабилизации и без нее на повороте и при активном маневрировании.

Методика реализована в программной среде SolidWorks 2016. Так на первом этапе была построена твердотельная 3D-модель цельнометаллического фургона ГАЗель NEXT (рис. 2). Она включает в себя основные узлы и агрегаты, определяющие инерционные характеристики автомобиля, такие как: рама 1, кузов 2, груз 3, двигатель 4, коробка передач 5, топливный бак 6, карданные валы 7, а также передняя подвеска 8, задний мост 9 и колеса 10 (рис. 2). Так как вес остальных деталей и узлов во много раз меньше, чем у выше перечисленных, было принято решение заменить их действие на динамическую модель эквивалентными силами, приложенными в местах крепления данных элементов.

Для проведения динамических исследований были построены 3D-модели дорожно-го полотна с заданной кривизной поворота и маневрирования, по которым двигалась мо-

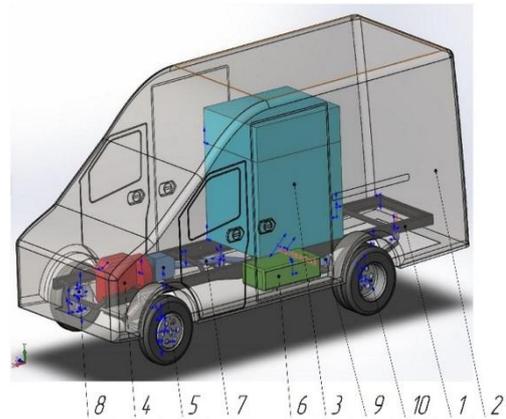


Рис. 2. 3D-модель цельнометаллического фургона ГАЗель NEXT (1 – рама, 2 – кузов, 3 – груз, 4 – двигатель, 5 – коробка передач, 6 – топливный бак, 7 – карданные валы, 8 – передняя подвеска, 9 – задний мост; 10 – колеса)

дель фургона. Первая модель представляла собой поворот, радиус которого в ходе опытов менялся в диапазоне от 30 м до 80 м. Вторая модель – это прямой участок дороги для проведения экспериментов с активным маневрированием. В качестве материала дорог использовался асфальт.

Далее по предложенной методике 3D-модели цельнометаллического фургона и дороги загружались в модуль для динамического исследования в SolidWorks Motion 2016, где в настройках контактов твердых тел задавалось взаимодействие между дорогой и колесами автомобиля [6] с коэффициентом трения скольжения 0,6. После этого в динамической модели настраивались передние пружины и задние рессоры с соответствующими коэффициентами жесткости подвески фургона ГАЗель NEXT с использованием системы рычажно-электромагнитной стабилизации или с рычажными стабилизаторами. С помощью модуля «демпферы» задавались амортизаторы с точками привязки в местах, соответствующих конструкции машины. Длина амортизатора в сжатом состоянии задавалась 365 мм, ход поршня 220 мм, номинальное усилие на сжатие 490 Н. Действие рычажно-электромагнитной системы стабилизации и рычажных стабилизаторов в процессе движения было заменено двумя парами эквивалентных сил, приложенных к пе-

редним рычагам и заднему мосту. Масса перевозимого груза составляла 1,2 тонны.

3. Динамическое моделирование

Исследования изменения угла крена кузова методом динамического моделирования в программной среде SolidWorks Motion 2016 осуществлялись в четыре этапа.

На первом этапе экспериментальных исследований определялась зависимость продольной устойчивости цельнометаллического фургона ГАЗель NEXT от режимов движения при повороте с базовым рычажным стабилизатором (рис. 3).

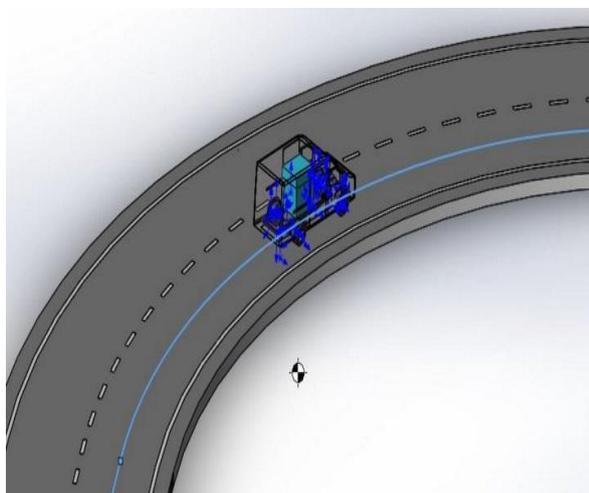


Рис. 3. Схема движение фургона ГАЗель NEXT при повороте

Для этого в динамической модели радиус поворота дороги поочередно устанавливались значения: 30, 40, 50, 60, 70 и 80 м, а также скорости движения фургона: 20, 30, 40 и 50 км/ч (рис. 4). В ходе каждого эксперимента фиксировалась максимальная величина угла крена кузова, которая впоследствии заносилась в табл. 1.

На втором этапе экспериментальных исследований определялись углы крена фургона ГАЗель NEXT при движении на повороте с использованием системы рычажно-электромагнитной стабилизации (рис. 5).

Как и на первом этапе, радиус поворота дороги и скорости движения фургона устанавливались прежними. Работа системы электромагнитной стабилизации заменялась

эквивалентной парой сил, приложенной к местам крепления электромагнитов.

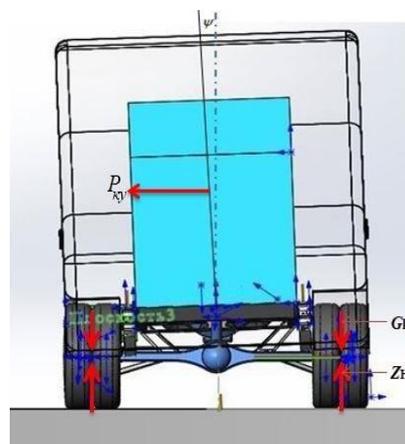


Рис. 4. Схема движение фургона ГАЗель NEXT при повороте с базовым рычажным стабилизатором (ψ – угол крена кузова; G_k – сила тяжести фургона; Z_H – нормальные реакции; $P_{кy}$ – поперечная сила)

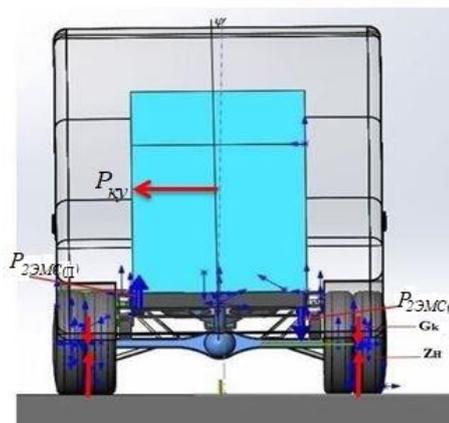


Рис. 5. Движение фургона ГАЗель NEXT в повороте с использованием системы рычажно-электромагнитной стабилизации ($P_{2ЭМС(П)}$ – подъемные усилия левого и правого электромагнитного стабилизатора; G_k – сила тяжести фургона; Z_H – нормальные реакции; ψ – угол крена кузова; G_k – сила тяжести фургона, Z_H – нормальные реакции)

В ходе каждого эксперимента также фиксировались величины угла крена кузова, которые впоследствии заносились в табл. 2.

Третий этап заключался в определении продольной устойчивости цельнометаллического фургона ГАЗель NEXT от режимов движения при активном маневрировании с

базовым рычажным стабилизатором (рис. 6, 7).

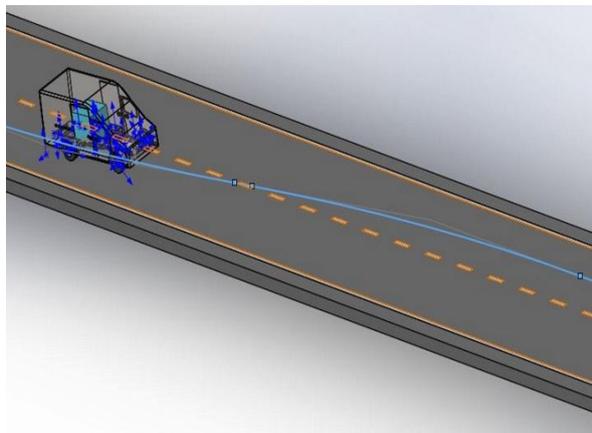


Рис. 6. Активное маневрирование фургона ГАЗель NEXT

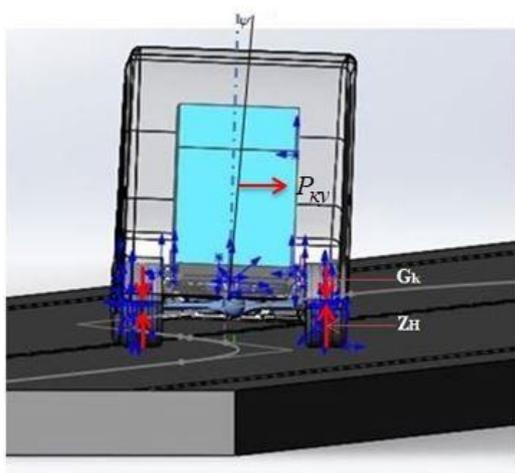


Рис. 7. Активное маневрирование фургона ГАЗель NEXT с базовым рычажным стабилизатором (ψ – угол крена кузова; G_k – сила тяжести фургона; Z_H – нормальные реакции; P_{ky} – поперечная сила)

Для этого в динамической модели задавалась скорость движения автомобиля при маневрировании: 50 км/ч, 60 км/ч, 70 км/ч, 80 км/ч, а скорость поворота управляемых колес изменялась в пределах от 0,05 до 0,25 рад/с (рис. 6, 7). Значение угла крена кузова с базовым рычажным стабилизатором (рис. 7) замерялось при каждом сочетании этих факторов и заносилось в табл. 3.

Четвертый этап исследований заключался в определении зависимости продольной устойчивости цельнометаллического фургона

ГАЗель NEXT, оборудованного электромагнитными стабилизаторами, при активном маневрировании (рис. 8).

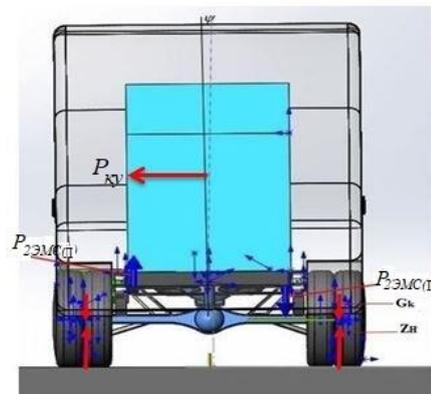


Рис. 8. Активное маневрирование фургона ГАЗель NEXT с использованием системы рычажно-электромагнитной стабилизации ($P_{2ЭМС(П)}$ – подъемные усилия левого и правого электромагнитного стабилизатора; G_k – сила тяжести фургона; Z_H – нормальные реакции; ψ – угол крена кузова)

Аналогично третьему этапу устанавливались режимы движения. Работа системы электромагнитной стабилизации заменялась эквивалентной парой сил, приложенной к местам крепления электромагнитов. Результаты опытов записывались в табл. 4.

4. Результаты моделирования и их обсуждение

Анализ результатов первого этапа моделирования показывает, что при повороте угол крена кузова фургона ГАЗель NEXT с базовым рычажным стабилизатором растет с увеличением скорости автомобиля и уменьшается с увеличением радиуса поворота (табл. 1). На максимальной скорости 50 км/ч угол крена изменяется в пределах от 2,5 до 4,3 градусов при значениях радиуса поворота от 80 м до 30 м соответственно. В тоже время, при минимальном радиусе поворота 30 м угол крена меняется в диапазоне от 2,9 до 4,3 град при скорости 20...50 км/ч. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что стандартные рычажные стабилизаторы не могут полностью устранить угол поперечного крена кузова при повороте, а на

предельных режимах движения с высокой скоростью и маленьким радиусом его значения приближаются к максимально допустимой конструкцией углу крена в 6 град. Все это приводит к ухудшению управляемости и увеличению динамической нагрузки на отдельные узлы и детали автомобиля, а также снижает устойчивость перевозимого груза.

Таблица 1
Угол крена кузова (в град) ГАЗель NEXT с базовым рычажным стабилизатором на повороте

Радиус поворота автомобиля, м	Скорость автомобиля, км/ч			
	50	40	30	20
80	2,5	2,1	1,6	1,2
70	2,9	2,4	1,9	1,5
60	3,4	2,7	2,4	1,8
50	3,7	3,1	2,6	2,3
40	3,9	3,5	3	2,6
30	4,3	3,8	3,4	2,9

В ходе динамических исследований, проведенных на втором этапе, было выявлено, что угол крена кузова фургона ГАЗель NEXT оборудованного электромагнитными стабилизаторами также растет с увеличением скорости автомобиля и уменьшается с увеличением радиуса поворота (табл. 2). Однако на максимальной скорости 50 км/ч угол крена изменяется в пределах 0,12...0,21 град, при радиусе поворота 80...30 м. При минимальном радиусе поворота 30 м угол крена меня-

Таблица 2
Угол крена кузова (в град) ГАЗель NEXT с использованием системы рычажно-электромагнитной стабилизации на повороте

Радиус поворота автомобиля, м	Скорость автомобиля, км/ч			
	50	40	30	20
80	0,12	0,11	0,09	0,061
70	0,13	0,12	0,10	0,083
60	0,14	0,13	0,11	0,098
50	0,16	0,14	0,13	0,110
40	0,19	0,17	0,14	0,130
30	0,21	0,19	0,17	0,15

ется в диапазоне 0,15...0,21 град при скорости 20...50 км/ч.

На основании результатов первых двух этапов динамических исследований можно сделать вывод, что применение в конструкции электромагнитных стабилизаторов позволяет уменьшить угол крена кузова на всех режимах движения в повороте практически до нуля, за счет чего обеспечится более высокая управляемость автомобиля, а также устойчивость и сохранность перевозимого груза.

Анализ результатов третьего этапа динамического моделирования показывает, что при активном маневрировании угол крена кузова фургона ГАЗель NEXT с базовыми рычажными стабилизаторами растет с увеличением скорости автомобиля и скорости поворота управляемых колес (табл. 3). На максимальной скорости 80 км/ч угол крена изменяется в пределах от 0,89 до 5,12 град, при скорости поворота управляемых колес от 0,05 до 0,25 рад/с соответственно. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что фургон ГАЗель NEXT со стандартными рычажными стабилизаторами при активном маневрировании обладает недостаточной устойчивостью.

Таблица 3
Угол крена кузова (в град) ГАЗель NEXT с базовым рычажным стабилизатором при маневрировании

Угловая скорость поворота управляемых колес, рад/с	Скорость автомобиля, км/ч			
	80	70	60	50
0,05	0,89	0,58	0,42	0,31
0,1	1,34	1,12	0,82	0,61
0,15	4,58	3,56	2,63	2,12
0,2	4,63	4,12	3,21	2,76
0,25	5,12	4,56	3,82	3,41

Динамические исследования, проведенные на четвертом этапе, показывают, что при активном маневрировании можно уменьшить угол крена кузова фургона ГАЗель NEXT за счет применения электромагнитных стабилизаторов. В таком случае при скоро-

сти маневрирования 80 км/ч и скорости поворота управляемых колес 0,05...0,25 рад/с угол крена будет находиться в пределах от 0,15 до 1,2 град (табл. 4).

Таблица 4
Угол крена кузова (в град) ГАЗель NEXT с использованием системы рычажно-электромагнитной стабилизации при маневрировании

Угловая скорость поворота управляемых колес, рад/с	Скорость автомобиля, км/ч			
	80	70	60	50
0,05	0,15	0,12	0,09	0,06
0,1	0,26	0,23	0,16	0,10
0,15	0,31	0,27	0,19	0,15
0,2	0,4	0,35	0,31	0,19
0,25	1,2	0,46	0,9	0,3

Полученные результаты показали актуальность и объективность предложенной методики динамического моделирования, которая показала, что система рычажно-электромагнитной стабилизации позволяет повысить поперечную устойчивость фургона, как на повороте, так и при маневрировании.

Список литературы

1. Тинт Наинг Вин, Сидоров В.Н. Исследование конструкции и принципов работы стабилизатор поперечной устойчивости // Научно-технические технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы регион. научно-техн. конф. Калуга: МГТУ им. Н.Э.Бауманна. 2019. Т.2. С 226-231.

2. Zhou G.X.M., Lan F.C., Chen J.Q. Research on Analysis and Optimization Design of Coach roll-over Based on FEM Technology // Modern Manufacturing

Заключение

1. Проведена разработка и апробация методики динамического моделирования в модуле SolidWorks Motion для исследования угла крена кузова на примере грузового фургона ГАЗель NEXT с оборудованием дополнительными электромагнитными стабилизаторами и без них на различных режимах движения при маневрировании и на повороте.

2. Полученные результаты моделирования показали, что при повороте цельнометаллического фургона ГАЗель NEXT с базовым рычажным стабилизатором со скоростью 20...50 км/ч угол крена кузова составил 1,2...4,3°, а при использовании дополнительных электромагнитных стабилизаторов позволяет уменьшить эти значения до 0,06...0,21°.

3. При активном маневрировании на скорости 50...80 км/ч с базовым рычажным стабилизатором угол крена варьируется в диапазоне 0,3...5,12°, а с использованием системы рычажно-электромагнитной стабилизации снижается до 0,06...1,2°. Таким образом, разработка методики и применение динамического моделирования позволили установить, что применение в конструкции цельнометаллического фургона ГАЗель NEXT системы рычажно-электромагнитной стабилизации позволяет в несколько раз повысить поперечную устойчивость при повороте и активном маневрировании, обеспечивая тем самым повышение безопасности движения транспортного средства.

References

1. Tint Naing Win, Sidorov V.N. Research on the design and operation of the anti-roll bar. Science-intensive technologies in instrumentation and mechanical engineering and the development of innovative activities in the university: Proceedings of the Regional Scientific and Technical Conference. Kaluga: BMSTU, 2019, Vol. 2, pp. 226-231. (In Russian)

2. Zhou G.X.M., Lan F.C., Chen J.Q. Research on Analysis and Optimization Design of Coach roll-over Based on FEM Technology. *Modern Manufacturing Engineering*, 2010,

Engineering. 2010. Vol.5. P.115.

3. Пат. 2293664 Российская федерация, МПК В60G 21/05. Стабилизатор поперечной устойчивости автомобиля / Сливинский Е.В., Некрасов А.Н.; заявитель и патентообладатель ЕГУ им. И. А. Бунина. №2005136507, заявл. 24.11.2005; опубл. 20.02.2007. Бюл. №5.

4. Пат. 47811 Российская федерация, МПК В60G 21/00. Стабилизатор поперечной устойчивости транспортного средства / Полищенко Ф.В., Матвейчук А.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью “ТехноМастер”. №2005108751, заявл. 28.03.2005; опубл. 10.09.2005.

5. Тинт Наинг Вин, Алакин В.М. Разработка методики обоснования конструкции и рабочих параметров рычажно-электромагнитной системы стабилизации поперечной устойчивости грузовых фургонов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №2. С. 142-149.

6. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation: Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации // М.: ДМК Пресс, 2015.

† Vol. 5, pp. 115/

† 3. Patent RU 2293664 *Stabilizator poperechnoy ustoychivosti avtomobilya* [Anti-roll bar of the car]. Slivinsky E.V. Nekrasov A.N. Declared 24.11.2005. Published 20.02.2007. Bulletin No. 5.

† 4. Patent RU 47811 *Stabilizator poperechnoy ustoychivosti transportnogo sredstva* [Anti-roll bar of the vehicle]. Polishchenko F.V., Matveychuk A.A. Declared 28.03.2005. Published 10.09.2005.

† 5. Tint Naing Win, Alakin V.M. Development of a method for substantiation of the design and working parameters of a lever-electromagnetic stabilizer of lateral stability system for stabilization of the transverse stability of cargo vans. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 142-149 (In Russian)

† 6. Alyamovsky A.A. *SolidWorks Simulation: Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* [SolidWorks Simulation: Engineering Analysis for Professionals: Tasks, Methods, Recommendations]. Moscow, DMK Press, 2015. 562 p. (In Russian)