

ОЦЕНКА ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПРИ ВЕДЕНИИ ОГНЯ

Р.О. Кутузов

kut-rom@yandex.ru

SPIN-код: 1227-2337

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

В рамках настоящей работы в программном комплексе «Универсальный механизм» созданы имитационные математические модели трех гусеничных мобильных роботов с различными массогабаритными характеристиками. Сымитирована стрельба очередью с ровной опорной поверхности из 7,62-мм пулемета «Объект 1», крупнокалиберного пулемета 12,7-мм «Объект 2», автоматического гранатомета «Объект 3», скорострельного крупнокалиберного пулемета 12,7-мм «Объект 4», автоматической 30-мм пушки «Объект 5» и одиночный выстрел из 57-мм пушки «Объект 6». В результате моделирования были получены графики сил давления гусениц на грунт в процессе стрельбы. На основании полученных результатов проведен анализ устойчивости, получен обобщенный критерий устойчивости машины, учитывающий массогабаритные характеристики и силу отдачи.

Ключевые слова

Гусеничная машина, устойчивость при стрельбе, мобильный робот, вооружение и военная техника, универсальный механизм, моделирование движения, robotic systems, имитационное моделирование, робототехнические системы, оценка качества

Поступила в редакцию 23.03.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. В настоящее время в мире идет активное внедрение мобильных роботов (МР) во многих сферах жизни, в том числе и в военной. На данный момент применяется большое количество роботов для выполнения самых разных задач. [1, 2] При проектировании МР военного назначения важную роль играет расчет устойчивости при стрельбе. В настоящей статье применен метод имитационного математического моделирования (ИММ) в среде «Универсальный механизм» [3, 4]. Метод ИММ заключается в создании математического отображения реального объекта, выраженного совокупностью алгебраических и дифференциальных уравнений, и позволяет имитировать поведение реальной механической системы так, как она работала бы в действительности. Создание имитационной математической модели сопряжено с необходимостью принятия определенных допущений, поскольку формирование точного математического отображения реальной системы крайне сложно или невозможно.

Расчетная схема. Объектом исследования является корпус МР с индивидуальной торсионной подвеской и гусеничным обводом.

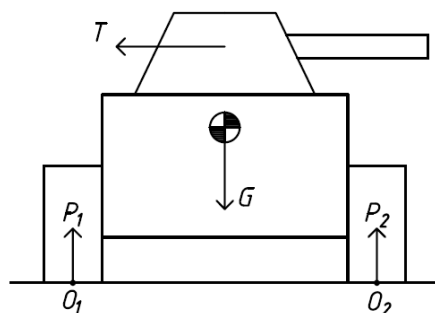


Рис. 1. Расчетная схема:

G — сила тяжести; T — сила отдачи;
 P_1, P_2 — силы реакции грунта

Устойчивостью гусеничной машины называют ее способность сохранять заданное положение при действии внешних сил или способность восстанавливать начальное положение после прекращения действия сил [5, 6].

Исследуя поперечную устойчивость, принимают, что оси опрокидывания проходят через точки O_1 и O_2 , положение которых определяет размер колеи B [5] (рис. 1). Геометрические размеры моделей показаны на рис. 2.

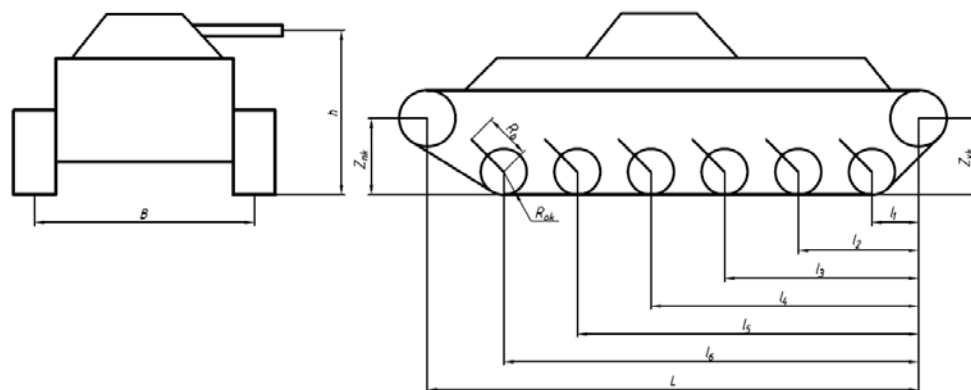


Рис. 2. Геометрические размеры модели

Таблица 1

Характеристики машин

Характеристика	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Полная масса, т	1	1,5	4
Колея B , м	1,4	2,5	3
Расстояние между ведущим и направляющим колесами L , м	2,03	3,6	4,6
Вертикальное расположение ведущего колеса $Z_{вк}$, м	0,5	0,55	0,6
Вертикальное расположение направляющего колеса $Z_{нк}$, м	0,5	0,55	0,6
Длина рычага балансира R_b , м	0,3	0,3	0,3
Радиус опорного катка $R_{ок}$, м	0,175	0,25	0,25
Подвеска катков	Индивидуальная торсионная		
Высота приложения силы отдачи L_v , м	1	1,5	1,5
Расположение катков, м:			
l_1	0,423	0,5	0,6
l_2	0,836	1,15	1,28
l_3	1,222	1,8	1,96
l_4	1,648	2,45	2,64
l_5	—	3,1	3,32
l_6	—	—	4

Для определения моментов инерции корпуса, исследуемого МР в САД системе NX был построен корпус. За основу был взят робототехнический комплекс «Нерехта». Габаритные размеры и моменты инерции относительно центра масс корпусов представлены в табл. 2: длина 2 600 мм, ширина 800 мм, высота 550 мм.

Таблица 2

Характеристики корпусов

Характеристика	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Длина, м	2,6	4,0	5,0
Ширина, м	0,8	2,0	2,5
Высота, м	0,55	0,65	0,65
Момент инерции относительно оси x , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	418,1	1 367	2 872
Момент инерции относительно оси y , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	1 990	3 698	8 401
Момент инерции относительно оси z , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	2 216	4 689	10 695

При построении модели принимали следующие допущения:

- 1) опорная поверхность горизонтальная;
- 2) стрельба ведется при угле возвышения $\varphi = 0^\circ$;
- 3) перемещение центра масс относительно корпуса, вследствие отката орудия при стрельбе отсутствует;
- 4) сила сопротивления отдачи постоянна на всем промежутке выстрела.

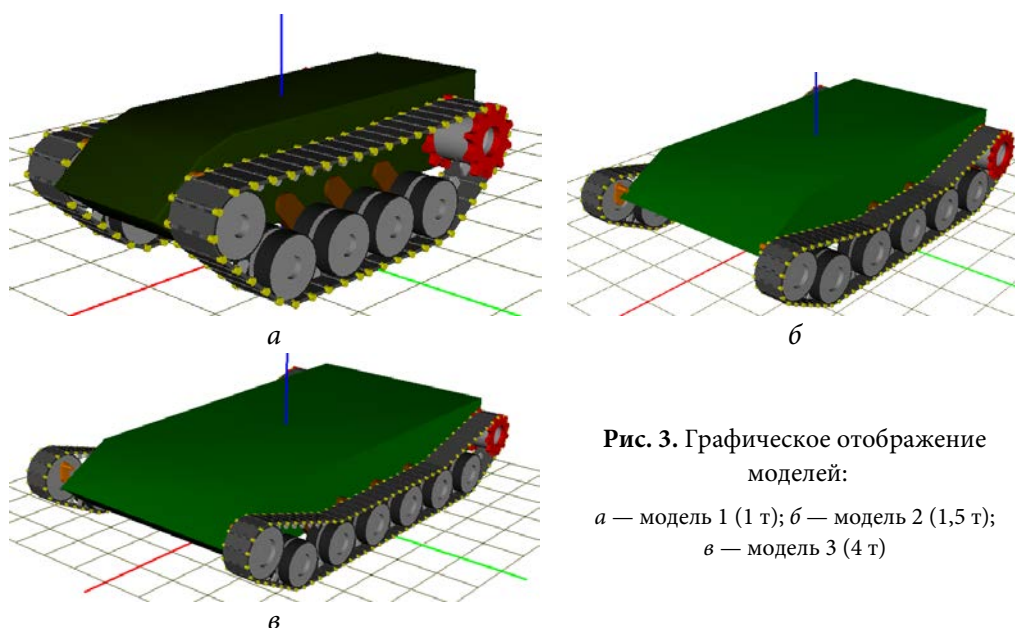


Рис. 3. Графическое отображение моделей:

a — модель 1 (1 т); b — модель 2 (1,5 т);
 v — модель 3 (4 т)

Лафет с орудием графически не отображены. В модели реализована подсистема гусениц, обладающая опорными катками, задняя ведущая звездочка и направляющее колесо. Жесткость торсионов автоматически высчитывается из статического, динамического ходов и статической нагрузки на каток. Для соединения

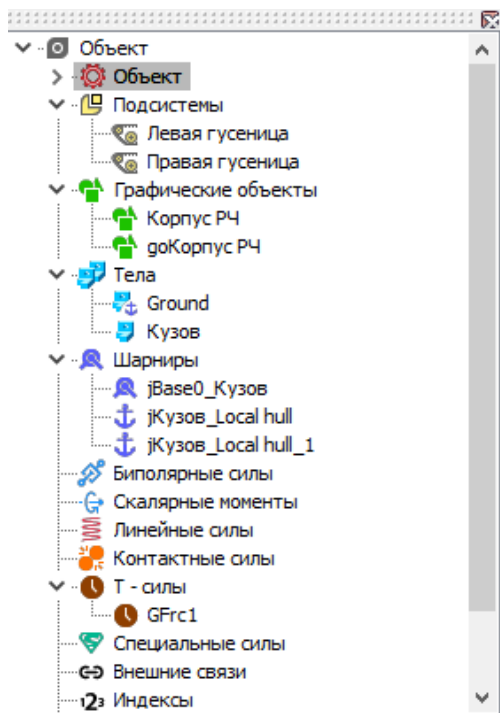


Рис. 4. Структура моделей

локального корпуса гусеницы с корпусом гусеничной машины использован шарнир типа «6 степеней свободы» с нулевым числом степеней свободы. Для исключения вырождения углов была выбрана схема углов *Cardan*(1, 2, 3) [3]. Структура моделей показана на рис. 4.

Вооружение. Движение ствола и связанных с ним деталей в сторону, противоположную движению снаряда во время выстрела под действием давления пороховых газов, называется отдачей. Сила, с которой орудие воздействует на опору во время отдачи, определяется через энергию [10, 11]. Из механики известно, что если на два тела, находящиеся в покое, действует одинаковая по величине сила, то скорость движения этих тел обратно пропорциональна их массам (весам). Но в

реальных условиях на скорость отдачи влияет последствие газов. Поэтому выражение скорости отдачи выглядит следующим образом [7–11]:

$$V_{\text{отд}} = \frac{\left(q + \omega \frac{u}{V_0}\right) V_0}{Q},$$

где $V_{\text{отд}}$ — скорость отдачи, м/с; q — масса снаряда, кг; u — средняя скорость истечения газов, м/с; ω — масса заряда; V_0 — начальная скорость снаряда, м/с; Q — масса оружия, кг.

Среднюю скорость истечения газов из канала ствола u для стрелкового оружия обычно принимают равной 1275 м/с. Отношение u/V_0 называется коэффициентом последствия газов. Этот коэффициент в среднем равен 1,6 [7–8]. Тогда для определения энергии (живой силы) отдачи общая формула для кинетической энергии примет вид

$$E_{\text{отд}} = \frac{QV_{\text{отд}}^2}{2g}.$$

Согласно теореме о кинетической энергии сила отдачи определяется следующим образом:

$$T_{\text{отд}} = \frac{E_{\text{отд}}}{l_{\text{отк}}},$$

где $l_{\text{отк}}$ — длина отката ствола, м.

Характеристики орудий приведены в табл. 3.

Воздействие сил отдачи выстрела в модели реализовано с помощью T -силы, приложенной к корпусу на высоте h , изменяющейся во время моделирования по заданному закону, заданному с помощью графика по точкам. На рис. 5 показан способ задания силы отдачи 30-мм пушки «Объект 5».

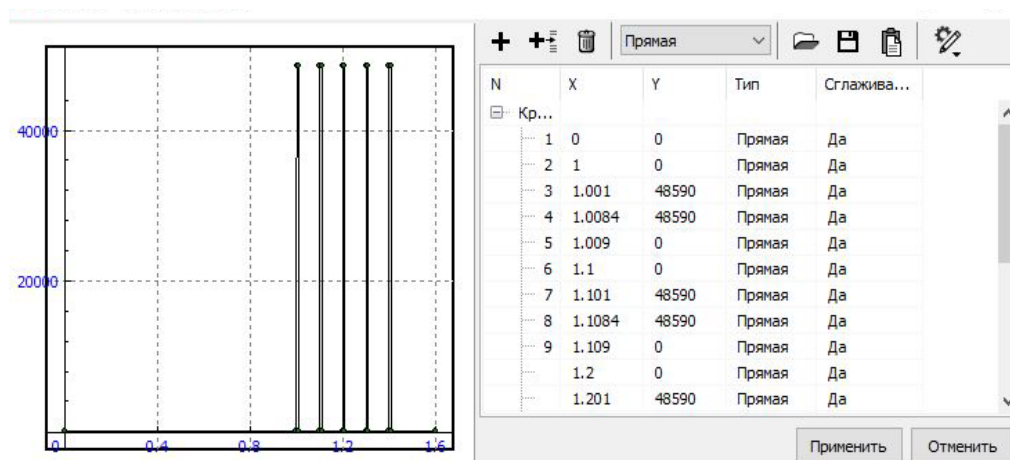


Рис. 5. Задание T -силы при моделировании

Таблица 3

Характеристики орудий

Орудие	Калибр, мм	Масса снаряда, г	Масса заряда, г	Начальная скорость снаряда, м/с	Длина отката, мм	Масса откатных частей, кг	Сила отдачи, кН
Объект 1	7,62	9	3,25	825	16	10,5	0,456
Объект 2	12,7	59	16,5	840	9	25	12,41
Объект 3	30	280	36	185	100	18	1,015
Объект 4	12,7	59	16,5	810	9	25	13,81
Объект 5	30	391	126	970	52	65,2	48,59
Объект 6	57	3 130	1355	990	340	382	104,4

Результаты расчета. В процессе моделирования определяли качественный показатель — потерю устойчивости. Измеряемым параметром является сила давления гусениц на грунт. В качестве результатов предоставлены графики, где по оси абсцисс отложено время моделирования, а по оси ординат — давление на грунт в ньютонах. Условием потери устойчивости считается первый критический момент, когда давление гусеницы на грунт равняется нулю [5].

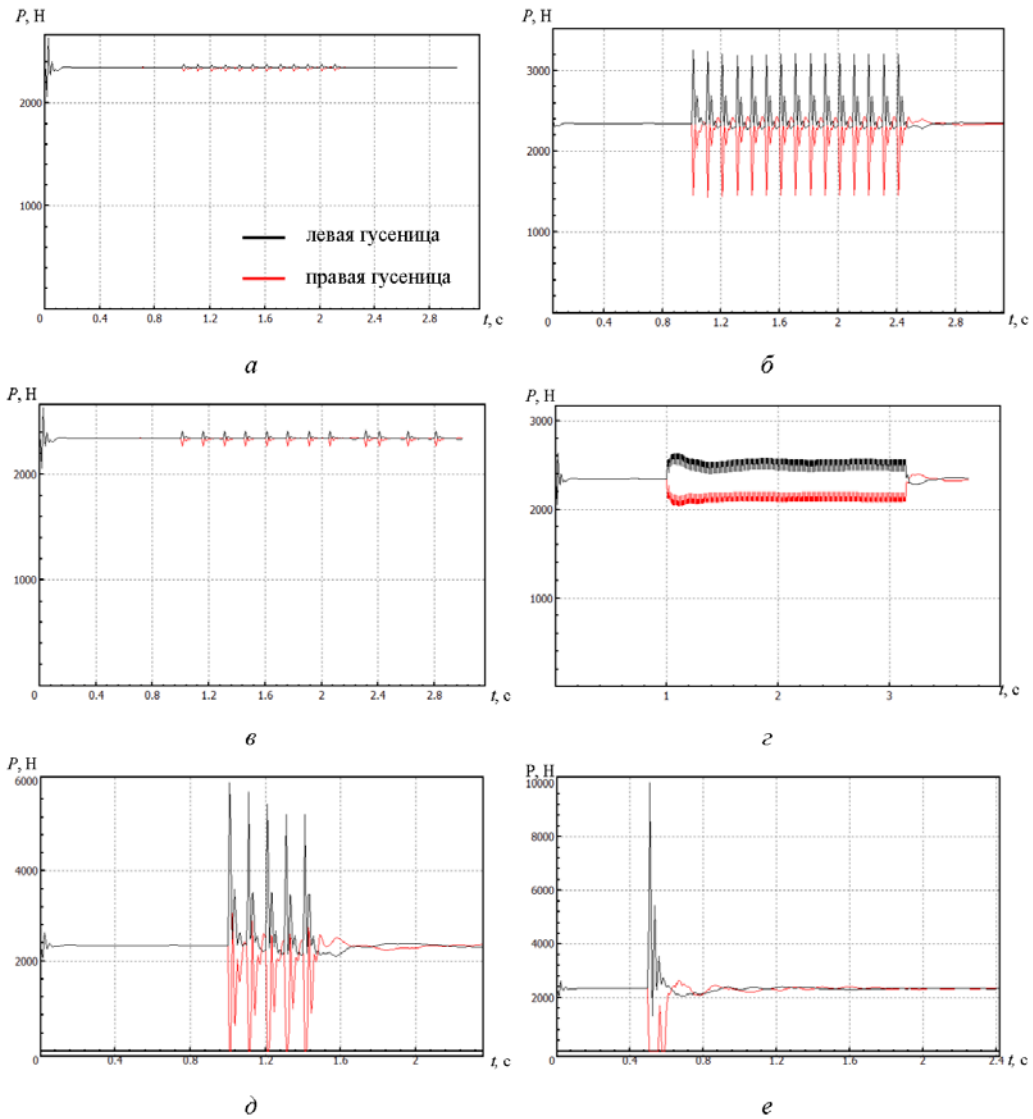


Рис. 6. Графики давления гусениц на грунт в момент выстрела для модели 1 (1 т):
a — 7,62-мм пулемет «Объект 1»; *б* — 12,7-мм пулемет «Объект 2»; *в* — 30-мм автоматический гранатомет «Объект 3»; *г* — 12,7-мм пулемет «Объект 4»; *д* — 30-мм автоматическая пушка «Объект 5»; *е* — 57-мм пушка «Объект 6»

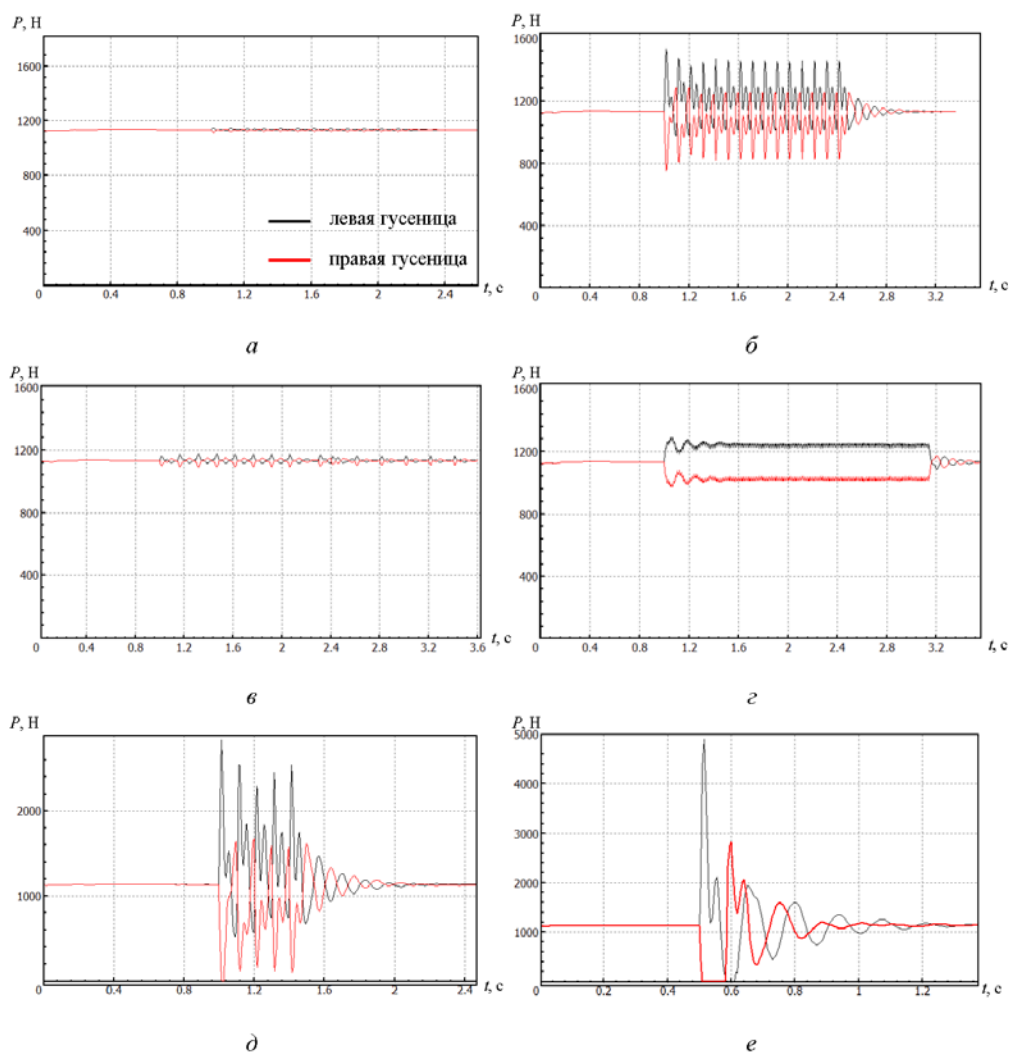


Рис. 7. Графики давления гусениц на грунт в момент выстрела для модели 2 (1,5 т):
a — 7,62-мм пулемет «Объект 1»; *б* — 12,7-мм пулемет «Объект 2»; *в* — 30-мм автоматический гранатомет «Объект 3»; *г* — 12,7-мм пулемет «Объект 4»; *д* — 30-мм автоматическая пушка «Объект 5»; *е* — 57-мм пушка «Объект 6»

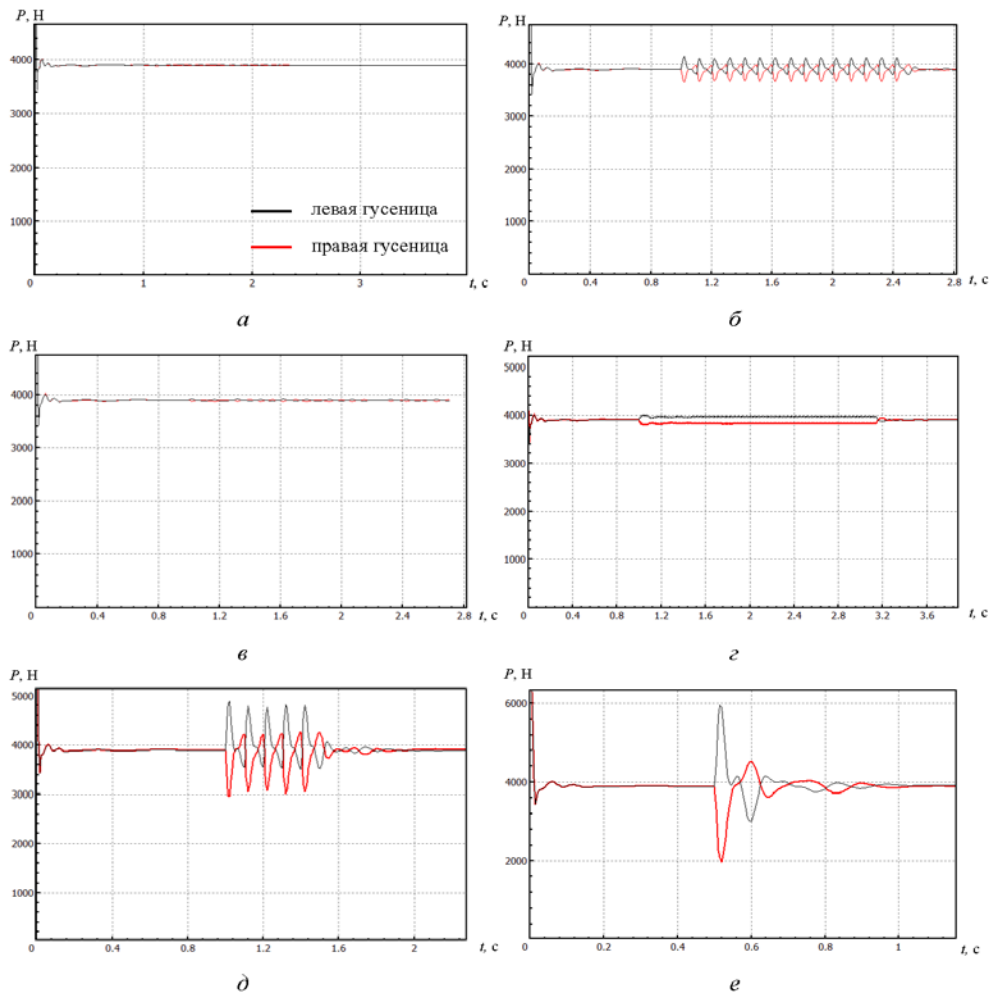


Рис. 8. Графики давления гусениц на грунт в момент выстрела для модели 3 (4 т):
 а — 7,62-мм пулемет «Объект 1»; б — 12,7-мм пулемет «Объект 2»; в — 30-мм автоматический гранатомет «Объект 3»; г — 12,7-мм пулемет «Объект 4»; д — 30-мм автоматическая пушка «Объект 5»; е — 57-мм пушка «Объект 6»

Анализ. Оценивая результаты расчета, можно заметить, что при стрельбе из 57-мм орудия и 30-мм пушки у первой и второй модели устойчивость утрачивается и происходит, отрыв гусеницы от грунта, с последующим возвращением в исходное положение с ударом об опорную поверхность, в остальных имитационных случаях все машины сохраняют устойчивость (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение результатов

Модель	Объект 1	Объект 2	Объект 3	Объект 4	Объект 5	Объект 6
1 (1 т)	+	+	+	+	-	-
2 (1,5 т)	+	+	+	+	-	-
3 (4 т)	+	+	+	+	+	+

Примечание: «+» — без отрыва гусеницы от основания ($P > 0$); «-» — отрыв гусеницы от основания ($P = 0$).

На поперечную устойчивость влияют масса M , высота приложения силы отдачи h и колея B . Увеличение массы и ширины колеи приводит к повышению устойчивости машины. При увеличении силы отдачи и высоты ее приложения устойчивость понижается.

Нетрудно заметить, что высота приложения силы отдачи и колея машины являются геометрическими характеристиками и постоянны для каждой отдельно взятой машины. Удобно рассчитать соотношение этих двух величин для каждой машины: $B/h = 1,4$ для модели 1; $B/h = 1,333$ для модели 2; $B/h = 3,333$ для модели 3.

Для сравнительной оценки вводится коэффициент устойчивости при ведении огня U , который равен соотношению параметров, влияющих на устойчивость, где в числителе — параметры, положительно влияющие на устойчивость, а в знаменателе — отрицательно.

$$U = M \frac{B}{h T_{\text{отд}}},$$

где M — масса машины, кг; h — высота приложения сил отдачи, м; B — колея, м; $T_{\text{отд}}$ — сила отдачи, Н.

Это позволяет предположить, что при росте коэффициента устойчивости машины будет расти, а при убывании — падать (табл. 5).

Таблица 5

Значения коэффициента устойчивости

Модель	Объект 1	Объект 2	Объект 3	Объект 4	Объект 5	Объект 6
1 (1 т)	3,071	1,379	0,113	0,119	0,0288	0,0134
2 (1,5 т)	4,387	1,970	0,161	0,169	0,0412	0,0192
3 (4 т)	29,24	13,132	1,074	1,129	0,274	0,128

Сопоставив табл. 4 и 5, можно сделать вывод, что потеря устойчивости наблюдается при значениях коэффициента $U \leq 0,0412$.

В коэффициенте не учитывается темп стрельбы исследуемого оружия, но из рис. 5–7 отчетливо видно, что пулеметы «Объект 2» и «Объект 4», имеющие почти одинаковую силу отдачи, при стрельбе очередями вызывают различные колебания корпуса. Причем более скорострельный пулемет «Объект 4» во всех трех исследованиях вызывает меньшее изменение давления гусениц на грунт. Это позволяет предположить, что вооружение с высоким показателем скорострельности предпочтительнее по устойчивости. Стоит учитывать, что темп стрельбы большинства сухопутного вооружения не достигает показателей пулемета «Объект 4».

Выводы. В результате моделирования выявлена возможность ведения огня из различного вооружения для трех машин различной массы и габаритов. Проанализирована зависимость устойчивости гусеничной машины в процессе стрельбы. Получен коэффициент, позволяющий оценить устойчивость разрабатываемой машины на этапе проектирования.

Литература

- [1] Корчак В.Ю., Лапшов В.С., Рубцов И.В. Перспективы развития наземных робототехнических комплексов военного и специального назначения. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2015, № 10(171), с. 83–95.
- [2] Машков К.Ю., Наумов В.Н., Харитонов С.А. и др. Перспектива применения гибридной трансмиссии для мобильных роботов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № S, с. 107–112.
- [3] 18_UM_Caterpillar: руководство пользователя. *universalmechanism.com: веб-сайт*. URL: http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/18_um_caterpillar.pdf (дата обращения: 13.11.2019).
- [4] gs_UM_Caterpillar: руководство пользователя. *universalmechanism.com: веб-сайт*. URL: http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/gs_um_caterpillar.pdf (дата обращения: 13.11.2019).
- [5] Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. М., Машиностроение, 1975.
- [6] Никитин А.О., Сергеев Л.В. Теория танка. М., Академия бронетанковых войск, 1962.
- [7] Чурбанов Е.В. Внутренняя баллистика. Л., ВАА им. Куйбышева, 1975.
- [8] Корнер Дж. Внутренняя баллистика орудий. М., Иностранная литература, 1953.
- [9] Граве И.П. Внутренняя баллистика. Пиродинамика. Л., Изд-во Артиллер. акад. РККА им. Дзержинского, 1933.
- [10] Вентцель Д.А. Внутренняя баллистика. М., ВВИА им. Жуковского, 1948.
- [11] Горст А.Г. Пороха и взрывчатые вещества. М., Машиностроение, 1972.

Кутузов Роман Олегович — студент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Машков Константин Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кутузов Р.О. Оценка поперечной устойчивости мобильного робота при ведении огня. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 04(45). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-04-599>

EVALUATION OF THE LATERAL STABILITY OF A MOBILE ROBOT WHEN SHOOTING

R.O. Kutuzov

kut-rom@yandex.ru

SPIN-code: 1227-2337

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

In this work, simulation mathematical models of three tracked mobile robots with various weight and size characteristics were created in the Universal Mechanism software package. A shooting sequence with a flat supporting surface was simulated for a 7.62 mm machine gun "Object 1", a large-caliber machine gun 12.7 mm "Object 2", an automatic grenade launcher "Object 3", a high-speed large-caliber machine gun 12.7 mm "Object 4", an automatic 30-mm gun "Object 5" and a single shot from a 57-mm gun "Object 6". As a result of the simulation, we obtained graphs of the pressure forces of the tracks on the ground during firing. Based on the results obtained, a stability analysis is carried out, a generalized stability criterion for the machine is obtained, taking into account the weight and size characteristics and recoil force.

Keywords

Tracked vehicle, firing stability, mobile robot, weapons and military equipment, universal mechanism, motion simulation, robotic systems, simulation, robotic systems, quality assessment

Received 23.03.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Korchak V.Yu., Lapshov V.S., Rubtsov I.V. Perspective of development for military and special ground robots. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, no. 10(171), pp. 83–95 (in Russ.).
- [2] Mashkov K.Yu., Naumov V.N., Kharitonov S.A., et al. Prospects of using hybrid transmission for mobile robots. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2010, no. S, pp. 107–112 (in Russ.).
- [3] 18_UM_Caterpillar: rukovodstvo pol'zovatelya [18_UM_Caterpillar: user guidelines]. *universalmechanism.com: website* (in Russ.). URL: http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/18_um_caterpillar.pdf (accessed: 13.11.2019).
- [4] gs_UM_Caterpillar: rukovodstvo pol'zovatelya [gs_UM_Caterpillar: user guidelines]. *universalmechanism.com: website* (in Russ.). URL: http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/g_s_um_caterpillar.pdf (accessed: 13.11.2019).
- [5] Zabavnikov N.A. Osnovy teorii transportnykh gusenichnykh mashin [Fundamentals of tracked vehicle theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975 (in Russ.).
- [6] Nikitin A.O., Sergeev L.V. Teoriya tanka [Tank theory]. Moscow, Akademiya bronzetankovykh voysk Publ., 1962 (in Russ.).
- [7] Churbanov E.V. Vnutrennyaya ballistika [Internal ballistics]. Leningrad, VAA im. Kuybysheva Publ., 1975 (in Russ.).
- [8] Corner J. Theory of the interior ballistics of guns. Wiley, 1950. (Russ. ed.: Vnutrennyaya ballistika orudiy. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1953.)

- [9] Grave I.P. Vnutrennyaya ballistika. Pirodinamika [Internal ballistics. Pyrodynamics]. Leningrad, Izd-vo Artiller. akad. RKKA im. Dzerzhinskogo Publ., 1933 (in Russ.).
- [10] Venttsel' D.A. Vnutrennyaya ballistika [Internal ballistics]. Moscow, VVIA im. Zhukovskogo Publ., 1948 (in Russ.).
- [11] Gorst A.G. Porokha i vzryvchatye veshchestva [Powders and explosives]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972 (in Russ.).

Kutuzov R.O. — Student, Department of Multi-purpose Caterpillar Machines and Mobile Robots, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Mashkov K.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Multi-purpose Caterpillar Machines and Mobile Robots, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Kutuzov R.O. Evaluation of the lateral stability of a mobile robot when shooting. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 04(45). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-04-599.html> (in Russ.).