

Научная статья
УДК 629.33

Методика нахождения центра масс средств индивидуальной мобильности

Максим Иванович Алексеенков¹, Виталий Валентинович Гаевский²,
Артур Рафикович Асоян³, Иван Александрович Юхин⁴,
Алексей Николаевич Андреев⁵, Егор Филиппович Дьяков⁶

^{1,2,3,5,6}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия.

⁴Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия.

⁴Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева (РГАТУ) Рязань, Россия.

¹alexeenkovmaxim@mail.ru

²vit-life@rambler.ru

³asoyan.ar@mail.ru

⁴yuival@rambler.ru

⁵andr_aleksei@mail.ru

⁶Yegor.dyakov.03@inbox.ru

Аннотация. В данной статье приведена методика нахождения центра масс средств индивидуальной мобильности (СИМ) для улучшения устойчивости данного типа средств в будущем. Были представлены три метода нахождения центра масс для электросамоката: метод площадей, метод взвешивания и метод 3D-моделирования. Помимо электросамокатов и других СИМ, данная методика также подходит для нахождения центров масс большинства одноколейных транспортных средств (ОТС). В качестве объекта испытаний был взят популярный частный складной электросамокат KuGoo S3, который имеет среднестатистическую конструкцию рамы, деки, механизмов торможения, типа привода и массу. Во время работы были сняты натурные размеры электросамоката и создана 3D-модель в САД программе с имитацией реального СИМ, помимо этого были проведены натурные испытания по второму методу нахождения центра масс с целью нахождения и сравнения относительной и абсолютной погрешности в расчетах и сравнении разных методов. Для создания цифрового двойника использовалась популярная САД система SolidWorks 2023 с предустановленными инструментами по нахождению центра масс как отдельного объекта, так и цельной сборки, каждый отдельный элемент имеет свою массу и свой материал.

Ключевые слова: электросамокат, средство индивидуальной мобильности, одноколейное транспортное средство, центр масс, устойчивость, 3D-моделирование, цифровой двойник.

Для цитирования: Алексеенков М.И., Гаевский В.В., Асоян А.Р., Юхин И.А., Андреев А.Н., Дьяков Е.Ф. Методика нахождения центра масс средств индивидуальной мобильности // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 4 (46).

Original article

The method of finding the center of mass of the means of individual mobility

Maxim I. Alexeenkov¹, Gaevskij Vitaly V.², Artur R. Asoyan³, Ivan A. Yukhin⁴ Alexey N. Andreev⁵, Egor Ph. Dyakov⁶,

^{1,2,3,5,6}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia.

⁴Peoples' Friendship University of Russia (RUDN Universiti), Moscow, Russia.

⁴Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev (RSATU), Ryazan, Russia.

¹alexeevmaxim@mail.ru

²vit-life@rambler.ru

³asoyan.ar@mail.ru

⁴yuival@rambler.ru

⁵andr_aleksei@mail.ru

⁶Yegor.dyakov.03@inbox.ru

Abstract. This article presents a methodology for finding the center of mass of individual mobility aids (SIM) to improve the sustainability of this type of means in the future. Three methods of finding the center of mass for an electric scooter were presented: the area method, the weighing method, and the 3D-modeling method. In addition to electric scooters and other SIM devices, this technique is also suitable for finding the centers of mass of most single-track vehicles. The popular private folding electric scooter KuGoo S3 was used as a test object, which has an average frame design, soundboard, braking mechanisms, drive type and weight. During the work, the full-scale dimensions of the electric scooter were taken and a 3D-model was created in a CAD program with an imitation of a real SIM, in addition, full-scale tests were carried out using the second method of finding the center of mass in order to find and compare the relative and absolute errors in calculations and comparing different methods. To create a digital twin, the popular SolidWorks 2023 CAD system was used with pre-installed tools for finding the center of mass of both an individual object and a complete assembly, each individual element has its own mass and its own material.

Keywords: electric scooter, means of individual mobility, single-track vehicle, center of mass, stability, 3D-modeling, digital twin.

For citation: Alexeenkov M.I., Gaevskij V.V., Asoyan A.R., Yukhin I.A., Andreev A.N., Dyakov E.Ph. The method of finding the center of mass of the means of individual mobility. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura.* 2025. № 4 (46).

Введение

Первое заметное появление электросамокатов в России было в 2016 г., но массовое распространение началось только в 2019 – 2020 годах с приходом на рынок кикшеринговых компаний. Главными потребителями средств

индивидуальной мобильности (СИМ) на тот момент были курьеры. Но по прошествии нескольких лет СИМ получил массовую популярность среди населения как для коротких поездок от дома до общественного транспорта, так и прогулочных в парковых и лесопарковых зонах. Число автомобилей в крупных городах, а также транспортные заторы способствуют развитию СИМ как альтернативному варианту автомобилям. С каждым годом популярность средств индивидуальной мобильности в Российской Федерации растет [12]. Это связано с низким порогом вхождения в начало управления электросамокатами, большим предложением кикшеринговых сервисов и лояльным законодательством в сфере управления СИМ. СИМ в Российской Федерации можно безопасно использовать только в теплое время года, но это не мешает их распространению в нашей стране. С ростом популярности СИМ начали проявляться характерные проблемы для всех одноколейных транспортных средств (ОТС), а именно: плохая устойчивость на низких скоростях и отсутствия кузова, который принимал бы энергию удара при падении или столкновении [2, 13]. Хотя СИМ и является самым безопасным средством передвижения, падение во время движения и резкого торможения из-за низкой устойчивости не редкость [1]. Для избежания травм и снижения количества падений необходимо повысить устойчивость СИМ, чтобы это сделать необходимо научиться определять координаты центра масс СИМ различной конструкции.

Объект испытаний

В качестве объекта испытаний был взят популярный китайский электросамокат с переднеприводной компоновкой и складным рулевым механизмом KuGoo S3 (рис. 1), массогабаритные характеристики электросамоката были сняты с объекта испытания для более точного определения центра масс, остальные характеристики, не оказывающие сильного влияния на конечный результат расчета, были взяты от официального поставщика и составлены в табл. 1 и 2 [11].



Рис. 1. Объект испытаний электросамоката KuGoo S3

Таблица 1

Характеристики KuGoo S3

Тип АКБ	Литий-ионный
Мощность мотор-колеса	250 Вт
Размер и тип колес	8 дюймов, литая резина + пластик
Максимальная скорость под нагрузкой	До 30 км/ч
Время полной зарядки	4 часа
Максимальный пробег на одном заряде	До 30 км
Емкость и напряжение АКБ	6 А, 36 В
Параметры зарядного устройства	42В, 1,5А
Масса	11,6 кг
Максимальная нагрузка	120 кг
Преодолеваемый угол наклона	15 градусов
Рабочая температура	От -10 до + 40 градусов
Наличие амортизаторов	Спереди и сзади
Регулировка руля по высоте	Да
Тормоза	Передний – рекуперативный Задний – тормоз – крыло
Наличие подножки	да

Методики нахождения центра масс

Представленные три различных метода нахождения центра масс для средств индивидуальной мобильности имеют свои достоинства и недостатки, о которых будет говориться в конце.

Существуют два классических методов определения центра масс для транспорта (в том числе и для ОТС, СИМ и автомобилей). Первый самый примитивный из всех изложенных – это нахождение положения центра масс

системы материальных точек из классической механики [10] предварительно упростив геометрию исследуемого объекта. Вторым методом – метод подвешивания, для его реализации необходим реальный физический объект испытаний и измерительное оборудование. И третьим методом является создание цифрового двойника (3D-моделирования) в САД программе SOLIDWORKS - 2023 [6].

Таблица 2

Параметры KuGoо S3

Условное обозначение	Параметр	Значение
L	Длина базы	0,85м
r_д	Динамический радиус колеса	0,10 м
G_a	Вес СИМ	113,80 $\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}^2}$
Дека		
a	Длина	0,55м
b	Ширина	0,15м
h	Высота	0,05м
m	Масса	2,00кг без аккумулятора 3,50кг с аккумулятором
L	Дорожный посвет	0,07м
Ведомое колесо		
r	Радиус	0,10м
b	Ширина	0,04м
m	Масса	1,00кг
Ведущее колесо (моторколесо)		
r	Радиус	0,10м
b	Ширина	0,05м
m	Масса	3,00кг
Руль		
h	Высота	0,99м
m	Масса	0,55кг
Механизм складывания		
m	Масса	1,10кг
Тормоз – крыло		
m	Масса	0,40кг
Передняя вилка		
m	Масса	1,50кг
Задняя вилка		
m	Масса	0,35кг
Переднее крыло		
m	Масса	0,20г

Центр масс СИМ методом площадей

Для этого метода упрощаем конструкцию и представляем электросамокат в виде четырех простых фигур и составляем компоновочную схему (рис. 2).

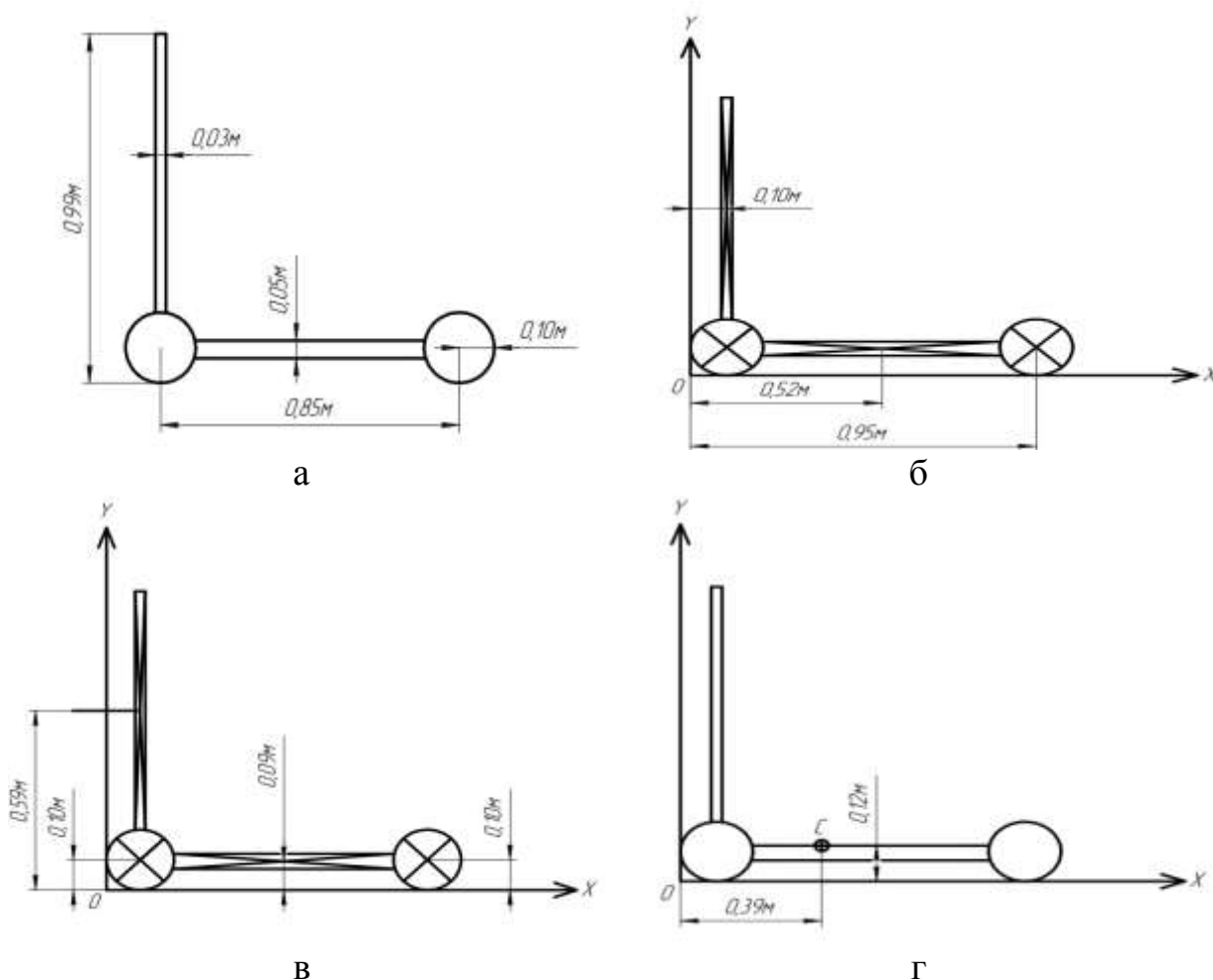


Рис. 2. Схема электросамоката в виде простых фигур; а – размеры СИМ; б – расстояние по оси X до центров масс фигур; в – расстояние по оси Y до центров масс фигур; г – координата центра масс

Для нахождения общего центра масс методом площадей воспользуемся расположением центров масс простых фигур, на которые разбит электросамокат (рис. 2 б).

Воспользуемся данными из таблицы 2 и формулами 1, 2 [4] для нахождения центра масс.

$$X_c = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} \quad (1)$$

$$Y_c = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i} \quad (2)$$

где m_i – масса i -го элемента, кг; x_i – длина от начала системы координат до центра масс i -го элемента, м; y_i – высота от начала системы координат до центра масс i -го элемента, м;

Разбиение электросамоката происходит в несколько этапов:

1) преобразование ведущих (мотор-колеса) и ведомых колес вместе с крыльями принимаем в виде окружности с обозначением их диаметров, точкой пересечения будет центром окружности, которая и является центром масс фигуры;

2) руль вместе с навесным оборудованием и механизмом складывания принять как прямоугольник, ширину принять за толщину цилиндра, углом наклона можно пренебречь. Откладываем диагонали и в точке их пересечения ставим центр фигуры, который является центром масс;

3) дека электросамоката вместе с механизмом крепления ведомого колеса и аккумулятором (находится внутри деки) принимаются как прямоугольник, откладываем диагонали и в точке их пересечения ставим центр фигуры, который является центром масс.

Так как для расчетов прибегли к геометрическому упрощению электросамоката, массы, элементов конструкции, которыми было принято пренебречь, присваивались другим элементам, угол наклона руля также изменили для упрощения расчетов (рис. 2 а).

Находим расстояния от оси до центров масс каждой из фигур по оси X (рис. 2 б) и подставляем значения в формулу 1:

$$\frac{0,1 \cdot (0,55) + 0,1 \cdot (3 + 1,5 + 0,2) + 0,52 \cdot (1,1 + 3,5) + 0,95 \cdot (1 + 0,4 + 0,35)}{0,55 + 3 + 1,5 + 0,2 + 1,1 + 3,5 + 1 + 0,4 + 0,35}$$

$$X_c = \frac{4,58}{11,6} = 0,39 \text{ м}$$

Находим расстояние от оси до центров масс каждой из фигур по оси Y (рис. 2 в) и подставляем значения в формулу 2:

$$\frac{0,59 \cdot (0,55) + 0,1 \cdot (3 + 1,5 + 0,2) + 0,09 \cdot (1,1 + 3,5) + 0,1 \cdot (1 + 0,4 + 0,35)}{0,55 + 3 + 1,5 + 0,2 + 1,1 + 3,5 + 1 + 0,4 + 0,35}$$

$$Y_c = \frac{1,38}{11,6} = 0,12 \text{ м}$$

Откладываем полученные значения от точки начала системы координат (принимая как перпендикуляр от края ведущего колеса к поверхности земли), затем строим точку С, которая и является центром масс электросамоката (см. рис. 2 з).

Полученные результаты заносятся в финальную таблицу для сравнения результатов всех измерений.

Центр масс СИМ методом взвешивания

Для нахождения центра масс данным методом необходимо воспользоваться следующими данными из таблицы 2: масса средства индивидуальной мобильности, массы, приходящей на ведущее и ведомое колесо m_1 и m_2 , которые предварительно находятся путем взвешивания. Процесс взвешивания повторяется три раза (рис. 3), после чего данные заносятся в таблицу 3 и определяются: a_{cp} (среднее значение), Δx (ошибка) и σ (среднее отклонение).

Далее для каждого отдельного элемента:

1. Если электросамокат использовался в условиях, подразумевающих возможность накопления грязи (городские, полигонные условия), то его необходимо очистить от загрязнений для более точных измерений.

2. Ведущее колесо (рис. 3 а) – необходимо установить электросамокат ведущим колесом на весы таким образом, чтобы он находился в равновесии. Для этого необходимо зафиксировать СИМ (можно использовать как веревки

для подвеса, так и руки) и придерживая за ручки добиться положения равновесия, при этом прилагать усилия, оказывающие влияния на показатели измерений, не допускаются.

3. Ведомое колесо (рис. 3 б) – электросамокат устанавливается ведомым колесом на весы. Для сохранения равновесия необходимо удерживать электросамокат, либо удерживать равновесие при помощи воздействия на рулевой механизм.

4. Электросамокат (рис. 3 в) Для более точных результатов необходимо установить весы на возвышенную твердую поверхность (например стол, или верстак), связано это с тем, что при взвешивании с рук (сначала взвешивается человек, а затем человек вместе с СИМ после чего высчитывается разница) за счет неравномерного распределения веса показатели получаются с высоким разбросом, в случае если установить весы на пол, также возникают неудобства, связанные с тем, что ведомое колесо будет упираться в пол, использование мягких стульев, как подставку для весов, не годится, так как мягкий материал будет принимать на себя нагрузку и показания весов будут далеки от реальных показателей. Поэтому лучший способ измерения – установить весы на край ровного прямоугольного (либо квадратного) стола и положить СИМ в сложенном состоянии по центру весов, предварительно органолептическим методом, определив примерное расположения центра масс (рис. 3 в).

5. После проведения всех манипуляций с измерениями, полученные результаты заносятся в таблицу 3 и находятся средние значения, ошибки и средние отклонения.

Из таблицы видно, что погрешность есть почти при каждом взвешивании, поэтому для будущих расчетов было принято решение использовать средние значения для каждого из элементов электросамоката.

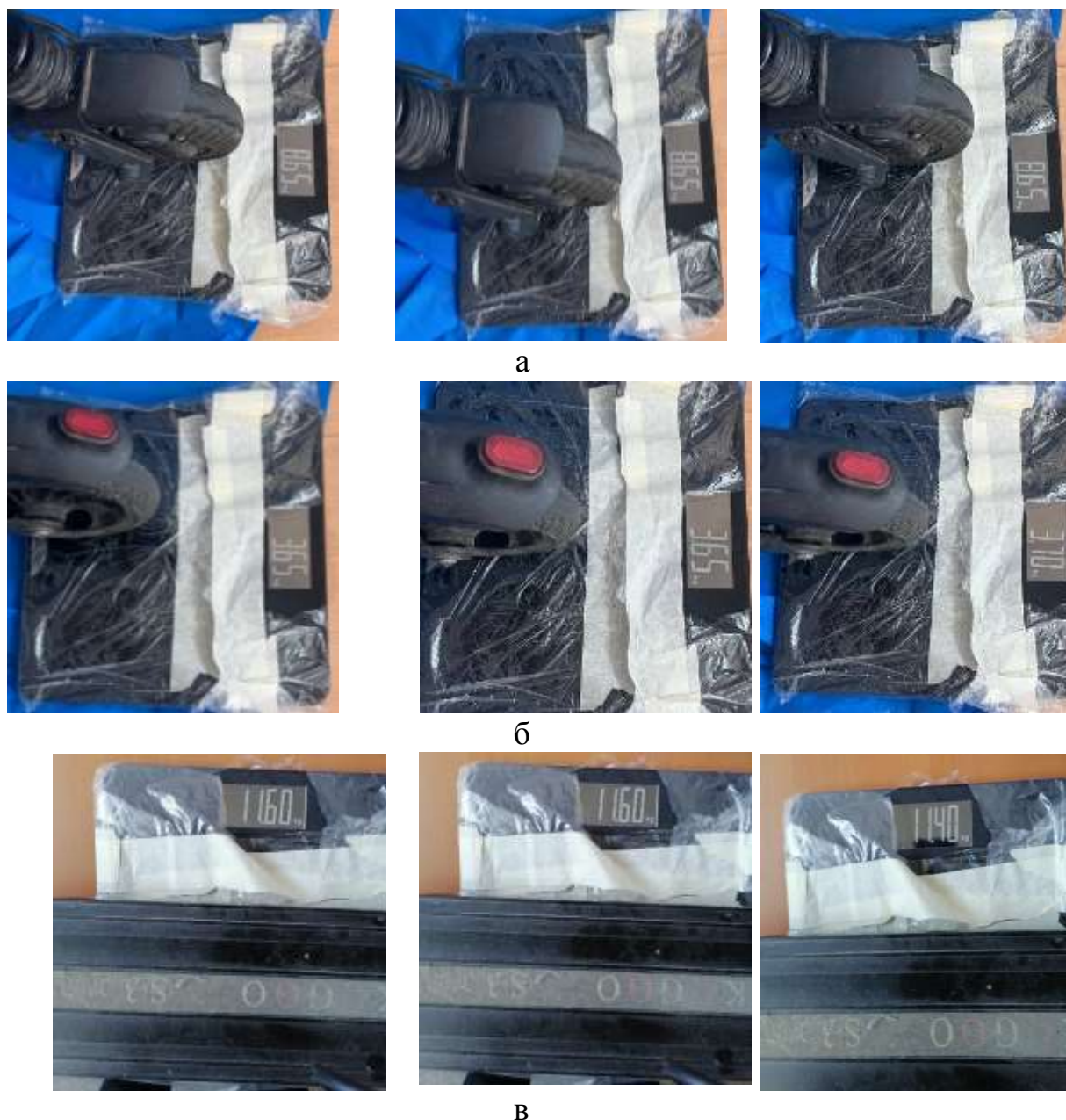


Рис. 3. Взвешивание электросамоката; а – взвешивание ведущего колеса; б – взвешивание ведомого колеса; в – взвешивание электросамоката

Таблица 3

Результаты взвешивания

Масса, приходящаяся на ведущее колесо m_1 , кг	8,65	8,65	8,65
Среднее значение $a_{ср}$, кг	8,65		
Ошибка Δx , кг	0	0	0
Среднее отклонение σ , %	0	0	0
Масса, приходящаяся на ведомое колесо m_2 , кг	3,65	3,65	3,70
Среднее значение $a_{ср}$, кг	3,67		

Продолжение Таблицы 3

Ошибка Δx , кг	0,02	0,02	0,03
Среднее отклонение σ , %	0,54	0,54	0,82
Масса СИМ m, кг	11,6	11,6	11,4
Среднее значение $a_{ср}$, кг	11,5		
Ошибка Δx , кг	0	0	-0,2
Среднее отклонение σ , %	0	0	2,6

Воспользовавшись уравнениям из теории движения одноколейных транспортных средств [3] определяем центр масс электросамоката:

$$a = L \cdot \frac{m_2}{m} \quad (3)$$

$$b = L \cdot \frac{m_1}{m} \quad (4)$$

где a – длина центра масс от ведущего колеса, м; b – длина центра масс от ведомого колеса, м; m_1 – масса, приходящаяся на ведущее колесо, кг; m_2 – масса, приходящаяся на ведомое колесо, кг; m – масса СИМ, кг; L – база электросамоката, м;

Воспользовавшись полученными значениями из таблицы 3, подставляем их в уравнения 3 и 4, после чего имеем:

$$a = 0,85 \cdot \frac{3,67}{11,6} = 0,27 \text{ м}$$

$$b = 0,85 \cdot \frac{8,65}{11,6} = 0,63 \text{ м}$$

Высота центра масс СИМ определяется методом подвешивания (рис. 4). Для реализации этого метода необходимо знать координаты по двум осям (длина от ведущего колеса и его высота). Поскольку взвешивание происходило в подвешенном состоянии, либо как в случае деки в параллельном от земли, фиксируем лист белой бумаги перпендикулярно деке электросамоката, а на листке бумаги отмечаем линию в соответствии с полученными координатами. Далее фиксируем подвес (в данном случае верёвка с грузиком) на руле электросамоката, после чего отрываем СИМ от земли и добиваемся положения равновесия (важно, чтобы электросамокат находился в подвешенном состоянии и не опирался ни на что) это можно сделать при помощи специальных фиксаторов по типу штативов, либо при

помощи вытянутых рук, при достижении положения равновесия находим точку пересечения линии и грузика, после чего отмечаем точку – эта точка и является центром масс (рис. 4 а). После того, как отметили точку, необходимо опустить электросамокат на твердую поверхность и измерить высоту от земли до точки пересечения двух линий и длину от оси координат до точки центров масс, координаты оси принять как перпендикуляр от касательной линии окружности к полу (рис. 4 б). Полученные координаты фиксируем.



а



б

Рис. 4. Подвешивание электросамоката; а – пересечение нити и линии центров масс; б – точка центров масс

С учетом новой системы координат имеем следующие координаты центра масс, найденного методом подвешивания:

$$X = 0,37 \text{ м}$$

$$Y = 0,23 \text{ м}$$

Центр масс СИМ методом 3D-моделирования в программе SolidWorks-2023

Создание 3D-модели в CAD программе возможно только с использованием реального объекта и измерительным инструментом, в качестве инструмента были использованы: рулетка 3 м, штангенциркуль, линейка 20 и 40 см. Далее будут представлены описание и короткие шаги по созданию цифрового двойника электросамоката (3D-модели) [8]:

1) ведущее колесо (мотор-колесо)

Создание сборочной компоновки следует начинать с моделирования ведущего колеса (рис. 5). При создании 3D-модели для упрощения построения и дальнейших расчетов можно пренебречь отдельными элементами экстерьера

электросамоката (так как массовые характеристики задаются во время сборки и особо не оказывают на конечный результат влияния). При создании 3D-модели мотор-колеса замеряем радиусы покрышки и самого мотора, также необходимо знать их толщину. Процесс создания показан на рисунке 5.

При моделировании создаём эскиз среза колеса, для этого замеряем радиус колеса, радиус мотора и их толщину для создания профиля колеса.

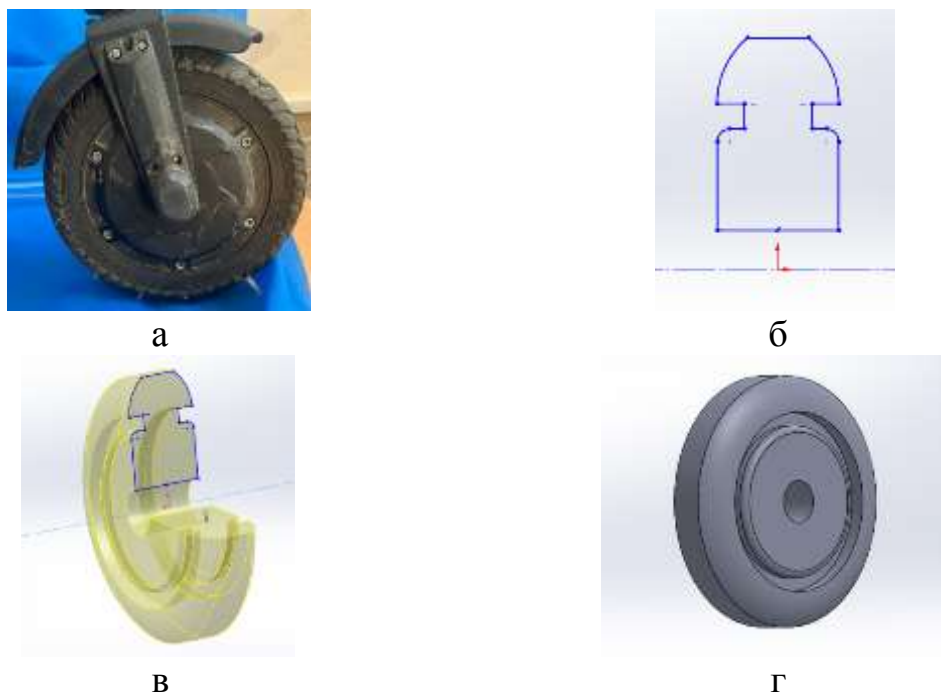


Рис. 5. Ведущее колесо; а – реальный вид; б – эскиз среза мотор – колеса; в – команда «повернуть» эскиз; г – 3D-модель

2) ведомое колесо

Ведомое колесо моделируется по аналогии с мотор-колесом, но в отличие от него у ведущего колеса имеются вырезы, ими можно пренебречь, так как масса колеса вместе с покрышкой будет задана при финальной сборке всех 3D элементов. Для создания эскиза замеряем радиусы диска и покрышки, их ширину и посадочный радиус подшипника, пример эскиза показан на рисунке 6, в качестве измерительного инструмента для отверстий используется штангенциркуль, для снятия радиусов применяются линейки и по необходимости рулетка.

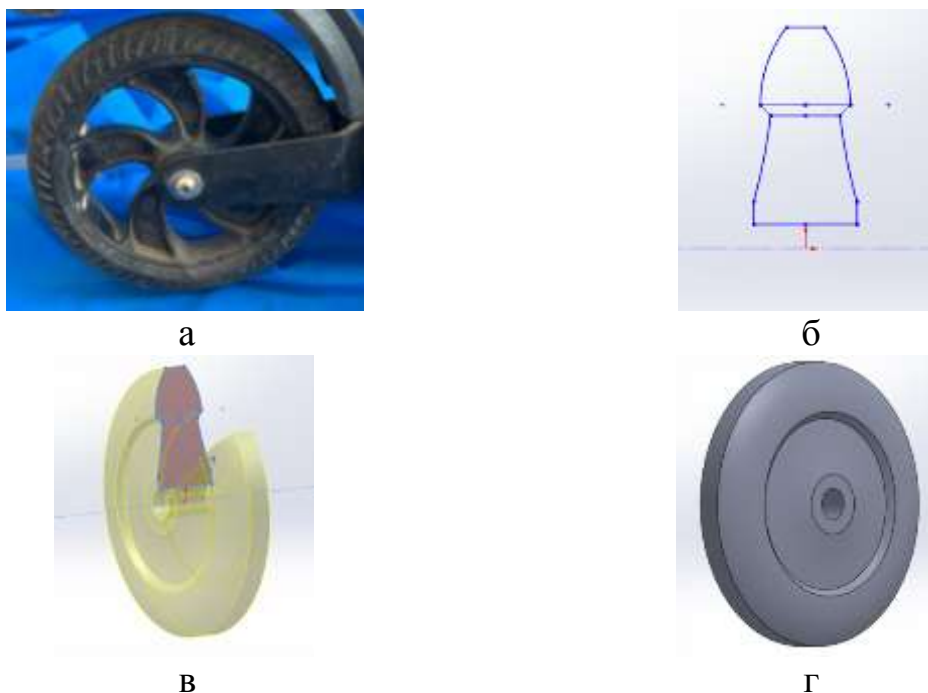


Рис. 6. Ведомое колесо; а – реальный вид; б – эскиз ведомого колеса; в – команда «повернуть» эскиз; г – 3D-модель

3) платформа (дэка)

Основным элементом, к которому будут присоединяться все элементы сборки, является платформа электросамока. При её моделировании для облегчения и уменьшения количества будущих сопряжений, и следовательно, погрешностей, необходимо проектировать деку вместе с крепежом складного механизма.

При моделировании используются следующие инструменты: рулетка, линейки и штангенциркуль. Сначала формируется очертание деки (рис. 7 б), вырез для аккумулятора делать не обязательно, но следует заранее позаботиться о точках привязки сопряжений аккумулятора и деки. После этого создается крепление заднего крыла, который помимо защитной функции выполняет роль ножного тормоза (рис. 7 в). Далее создаётся эскиз самого сложного элемента – складного механизма, для снятия его размеров используются штангенциркуль, после создания очертаний механизма также необходимо спроектировать вал, на который будут ссылаться будущие сопряжения от рулевого механизма (рис. 7 г-ж).

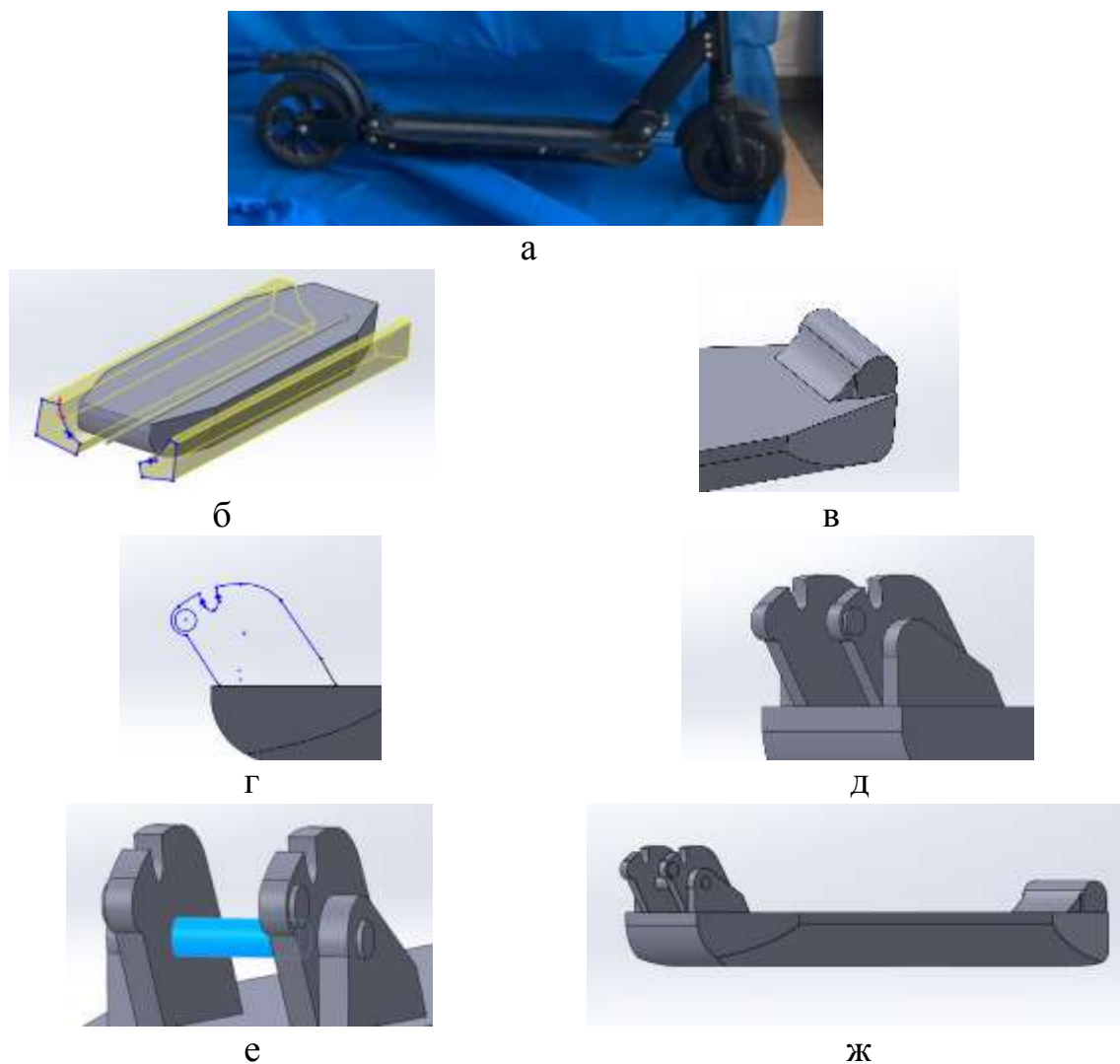


Рис. 7. Платформа: а – реальный вид платформы; б – вырез в деке; в – крепление заднего крыла; г – эскиз механизма складывания; д – механизм складывания; е – вал крепления механизма складывания; ж – 3D-модель деки

4) заднее крыло, вилка и аккумулятор

Заднее крыло создаётся вместе с вилкой крепления ведомого колеса так как нет необходимости разбивать этот узел на разные элементы, также создаётся аккумулятор в форме параллелепипеда. В качестве измерительного инструмента в основном используется штангенциркуль, поскольку в этой сборке большое количество окружностей и отверстий. Для начала формируется эскиз вилки (рис. 8 б), после чего в нем создается цилиндр, который выполняет функцию крепления ведомого колеса (рис. 8 в). После чего создается выступ для крепления всей конструкции к деке, для создания крыла необходимо снять радиусы и размеры сужения (рис. 8 г). Аккумулятор создаётся без очертаний, поскольку он будет находиться внутри деки (рис. 8 е).

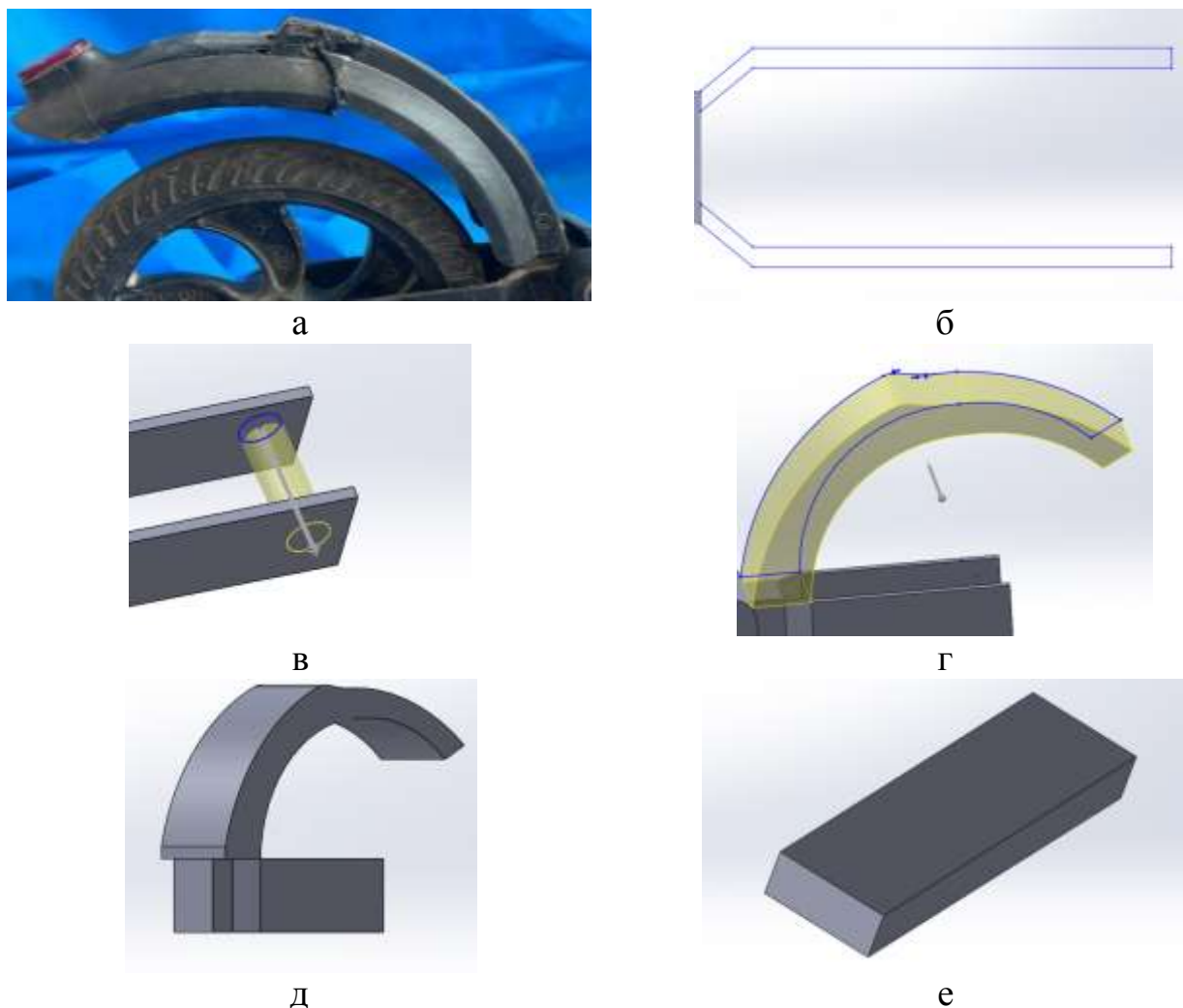


Рис. 8. Заднее крыло и аккумулятор; а – реальный вид заднего крыла; б – эскиз вилки; в – вал крепления ведомого колеса; г – эскиз и вытяжка заднего крыла; д – 3D-модель заднего крыла и вилки е – 3D-модель аккумулятора

5) механизм крепления (складываемая часть рулевого механизма)

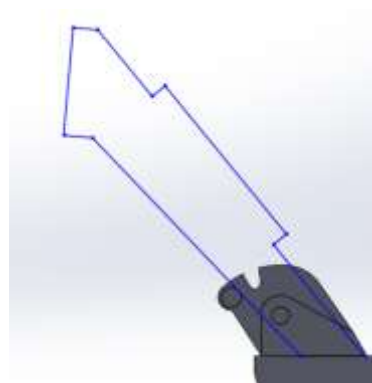
Механизм крепления является сложным элементом конструкции электросамоката, для упрощения проектирования можно пренебречь некоторыми деталями и добавить элемент крепления к рулевому механизму.

Для постройки 3D-модели необходимо знать на какой угол относительно деки отклоняется механизм крепления, необходимо учесть размеры. Чтобы при сборке не возникали проблемы, для этого можно добавить фиксатор. Основными инструментами будут штангенциркуль и рулетка. Для упрощения проектирования данного узла можно использовать уже готовую часть от деки, для этого создаём копию файла и относительного складного

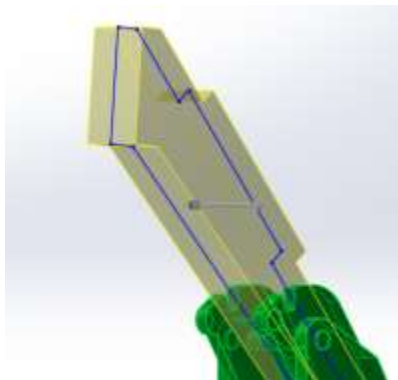
механизма начинаем проектировать складываемую часть (рис. 9 б). Снимаются размеры длины и толщины, после чего создается эскиз с выпяжкой (рис. 9 в). После создания основной части элемента, необходимо сделать посадочное место для рулевого механизма, для этого при помощи штангенциркуля снимаем размеры радиусов и создаем дополнительные плоскости, чтобы сделать цилиндры с отверстиями, также нельзя забывать и об угле наклона (рис. 9 г). В конце необходимо создать посадочный элемент для сопряжения складываемой части с декой электросамоката (рис. 9 д).



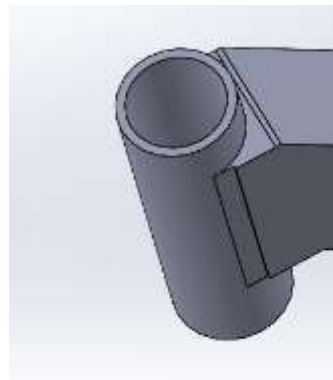
а



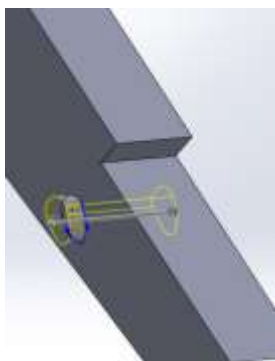
б



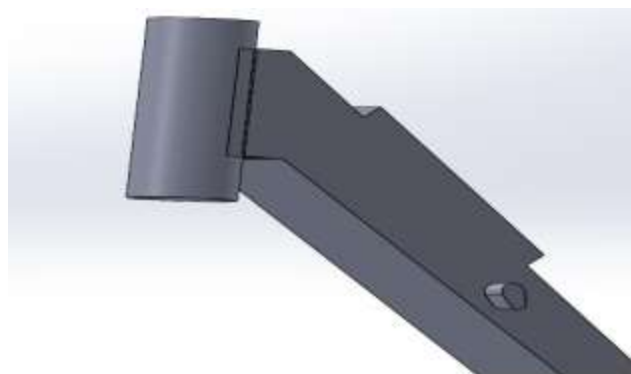
в



г



д



е

Рис. 9. Складной механизм; а – реальный вид; б – эскиз механизма; в – выпяжка; г – вал для крепления рулевого механизма; д – фиксатор; е – 3D-модель

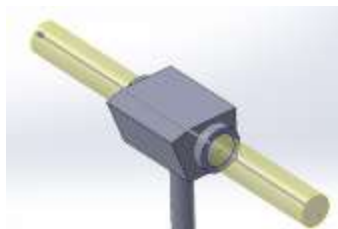
б) рулевой механизм

Финальным элементом является рулевой механизм. Поскольку он состоит в основном из цилиндрических элементов, то основными измерительными инструментами будут являться штангенциркуль и рулетка.

Построение начинается с вала. Далее проектируется экран с рукоятками (рис. 10 б). В нижней части проектируем вилку с посадочным цилиндром для мотор-колеса (рис. 10 в). Переднее крыло было принято объединить с нижней частью рулевого механизма (рис. 10 г).



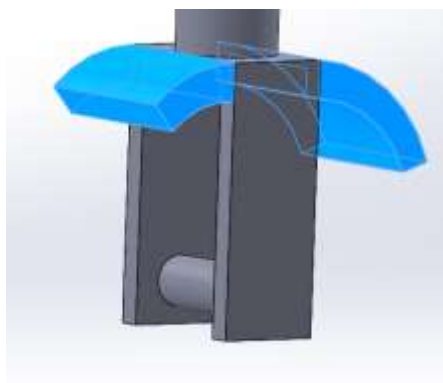
а



б



в



г



д

Рис. 10. Рулевой механизм: а – реальный вид; б – ручка руля; в – вилка ведущего колеса; г – переднее крыло; д – 3D-модель рулевого механизма

Сборка 3D-модели СИМ в программе SolidWorks-2023

После проектирования каждого отдельного элемента в программе SolidWorks-2023 создаем новый файл «Сборка» [7], где выбираем деталь относительно которой и будет создаваться сборка при помощи команды «сопряжение» [9], в нашем случае это мотор–колесо так как относительно него будет проще создать правильный угол для деки, также для облегчения работы и последующего нахождения центра масс заранее можно задать свою ось координат (по примеру как в предыдущих методах: вертикальная ось должна касаться ведущего колеса), относительно этой оси можно проложить горизонтальную линию, имитирующую плоскую горизонтальную поверхность. После того, как поставили ведущее колесо, он приобретает формат «фиксированный» (ф), что делает его полностью неподвижным. Далее отдельно добавляются элементы, рекомендуемые в такой последовательности: рулевой механизм, который крепится к ведущему колесу через привязки касание и конические поверхности; следующим следует поставить складываемую часть рулевого механизма, которая крепится через конические сопряжения (для облегчения можно также ограничить высоту при помощи дополнительных построений и добавить две точки на цилиндрических поверхностях рулевого колеса и добавить два сопряжения по касаниям); к механизму крепления присоединяем деку через механизм складывания и также используем конические сопряжения и пересечения; аккумулятор устанавливается в деку электросамоката на заранее поставленные точки привязки, в сопряжении используем пересечения и параллельность верхней части деки; вилка с крылом ставится в заднюю часть деки через пересечения; ведомое колесо устанавливается в вал задней вилки при помощи конического сопряжения, также его можно ограничить при помощи дополнительных точек на цилиндре. После того, как все элементы СИМ были сопряжены, необходимо задать касательность к окружности ведомого колеса и оси, которую заранее создали для оси координат (рис. 11 а). После чего

необходимо воспользоваться инструментом «массовые характеристики» [5], для этого необходимо для каждого отдельного элемента задать его массу и (по возможности) материал. Массы принимаем из таблицы 1 и 2, также для сверки их можно было определить во время снятия размеров для моделирования. Далее необходимо выбрать координатную сетку (которая заранее была создана относительно крайней части ведущего колеса). После распределения масс и выбора нулевой координаты, необходимо выделить все элементы и воспользоваться командой «Пересчитать», далее появляются координаты центра масс относительно выбранной системы координат, после чего на итоговой сборке появляется значок, отображающий расположение центра тяжести сборки в реальном времени во всех трех плоскостях (рис. 11 б) [14, 15].



Рис. 11. 3D-модель электросамоката KigooS3; а – сборочная 3D-модель; б – расположение центра масс

Согласно результатам вычислений программного обеспечения SolidWorks имеем следующие координаты центра масс электросамоката:

$$X = 376,02 \text{ мм} = 0,38 \text{ м}$$

$$Y = 239,90 \text{ мм} = 0,24 \text{ м}$$

Апробация результатов

Были рассмотрены три метода нахождения центра масс для средств индивидуальной мобильности: метод площадей, взвешивания и

3D-моделирования в программе SolidWorks 2023; результаты всех измерений приведём в единую таблицу 4 и сравним результаты.

Таблица 4

Результаты нахождения центра масс разными методами

Метод	Координаты по длине (X, м)	Координаты по высоте (Y, м)
Площадей	0,39	0,12
Взвешивания	0,37	0,23
3D-моделирования	0,38	0,24

В качестве эталонного результата принимаем значения, полученные по методу взвешивания, так как они получены при работе с реальным физическим объектом.

Из анализа результатов видно, что метод площадей дает наибольшую разницу от принятого эталонного значения, а именно погрешность в 5% по длине и 92% по высоте, в то время как разница с методом 3D-моделирования составляет не более 1%, что можно принять как погрешность измерений.

Заключение

Подводя итог, можно сказать, что метод взвешивания является самым простым способом нахождения центра масс для СИМ, так как для его реализации мы работаем с физическим объектом, и как следует из этого получаем реальные значения координат центра масс. При работе с методом площадей можно пренебречь большим количеством параметров и упростить модель СИМ до 4 фигур. Для реализации метода 3D-моделирования необходимо знать массогабаритные размеры и иметь хорошую вычислительную технику. Преимущество 3D-моделирования заключается в том, что в результате получаем максимально приближенный результат к реальным значениям, а также сборочная 3D-модель позволяет нам использовать ее в нахождении центра масс электросамоката в различных позициях, что при условии использования метода взвешивания проблематично.

Список источников

1. Гатиятуллин, М. Х. Обеспечение безопасности движения средств индивидуальной мобильности / М. Х. Гатиятуллин, И. А. Николаев // Техника и технология транспорта. – 2024. – Т. 35, № 4. – С. 17. – EDN GRVPPA.
2. Журавлев, А. С. Средство индивидуальной мобильности как новый вид транспортного средства / А. С. Журавлев, Е. А. Янкевич // Правоохранительные органы: теория и практика. – 2023. – № 2(45). – С. 101-103. – EDN ZDPESQ.
3. Гаевский, В. В. Развитие теории движения одноколейных транспортных средств : монография / В. В. Гаевский. – Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2019. – 176 с. – ISBN 978-5-7962-0257-9. – EDN YPTCMJ.
4. Определение центр тяжести плоских фигур. – URL: https://swsu.ru/sveden/files/MU_Opreделение_centra_tyaghesti_ploskix_figur.pdf.
5. Отображение Массовых характеристик. – URL: https://help.solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/sldworks/t_displaying_mass_properties.htm.
6. Самоучитель SolidWorks (2018). – URL: <https://studizba.com/files/show/pdf/51808-1-samouchitel-solidworks-2018.html>.
7. Сборки. – URL: <https://help.solidworks.com/2012/Russian/solidworks/Sldworks/Assemblies.htm>.
8. Создание элементов вращения. – URL: https://help.solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/Sldworks/t_Creating_Revolve_Features.htm.
9. Сопряжение. – URL: https://help.solidworks.com/2012/Russian/solidworks/Sldworks/Mates_Overview.htm.
10. Центры тяжести и геометрия. – URL: <https://old.mccme.ru/free-books/mmmf-lectures/book.40.pdf>.
11. Электросамокат Kugoo S3. – URL: <https://kugoo-s3.ru/>.
12. Юнг, А. А. Оценка аварийности средств индивидуальной мобильности в различных условиях движения / А. А. Юнг, А. Г. Шевцова // Современная наука. – 2021. – № 2. – С. 31-36. – DOI 10.53039/2079-4401.2021.4.2.007. – EDN VELXFF.
13. Ляхов, П. В. Аварийность с участием средств индивидуальной мобильности, оснащенных электродвигателем / П. В. Ляхов, Е. А. Лопарев // Безопасность дорожного движения. – 2022. – № 1. – С. 35-41. – EDN VVLYEC.
14. Биткина, Е. Е. Использование анимации сборки в системе SOLIDWORKS / Е. Е. Биткина, А. А. Таткало, И. И. Тарануха // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях : Сборник VI Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения доктора технических

наук, профессора Станислава Антоновича Корниловича (9 декабря 1931 г. - 25 октября 2020 г.), Омск, 18 ноября 2021 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2021. – С. 204-208. – EDN ZWESHV.

15. Skafa, E. I. Integration of Mathematical and Computer Simulation Modeling in Engineering Education / E. I. Skafa, E. G. Evseeva, M. E. Korolev // Journal of Siberian Federal Universit. Mathematics and Physics. – 2022. – Vol. 15, No. 4. – P. 413-430. – DOI 10.17516/1997-1397-2022-15-4-413-430. – EDN DVKKTW.

References

1. Gatiyatullin M. H., Nikolaev I.A. *Tekhnika i tekhnologiya transporta*, 2024, vol. 35, no. 4, pp. 17.
2. Zhuravlev A.S., Yankevich E.A. *Pravookhranitel'nyye organy: teoriya i praktika*, 2023, no. 2(45), pp. 101-103.
3. Gayevsky V.V. *Razvitiye teorii dvizheniya odnokoleynykh transportnykh sredstv* (The development of the theory of motion of single-track vehicles) Moscow, MADI, 2019, 176 p.
4. Opredeleniye tsentr tyazhesti ploskikh figure, available at: https://swsu.ru/sveden/files/MU_Opredelenie_centra_tyazhesti_ploskix_figur.pdf.
5. Otobrazheniye Massovykh kharakteristik, available at: https://help.solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/sldworks/t_displaying_mass_properties.htm.
6. Samouchitel' SolidWorks (2018), available at: <https://studizba.com/files/show/pdf/51808-1-samouchitel-solidworks-2018.html>.
7. Sborniki, available at: <https://help.solidworks.com/2012/Russian/solidworks/Sldworks/Assemblies.htm>.
8. Sozdaniye elementov vrashcheniya, available at: https://help.solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/Sldworks/t_Creating_Revolve_Features.htm.
9. Sopryazheniye, available at: https://help.solidworks.com/2012/Russian/solidworks/Sldworks/Mates_Overview.htm.
10. Tsentry tyazhesti i geometriya, available at: https://old.mccme.ru/free-books/mmmf-lectures/book_40.pdf.
11. Elektrosamokat Kugoo S3, available at: <https://kugoo-s3.ru/>.
12. Jung A.A., Shevtsova A.G. *Sovremennaya nauka*, 2021, no. 2, pp. 31-36, doi 10.53039/2079-4401.2021.4.2.007.
13. Lyakhov P.V., Loparev E.A. *Bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya*, 2022, no. 1, pp. 35-41.
14. Bitkina E.E., Tatkalov A.A., Taranukha I. I. *Innovatsionnyye tekhnologii v APK, kak faktor razvitiya nauki v sovremennykh usloviyakh*: Sbornik konferentsii, Омск, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2021, pp. 204-208.

15. Skafa E.I., Evseeva E.G., Korolev M.E. Integration of Mathematical and Computer Simulation Modeling in Engineering Education, *Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics*, 2022, vol. 15, no. 4, pp. 413-430, doi 10.17516/1997-1397-2022-15-4-413-430.

Рецензент: И.Я. Якубович, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Алексеев Максим Иванович, аспирант, МАДИ.

Гаевский Виталий Валентинович, д-р техн. наук, проф., МАДИ.

Асоян Артур Рафикович, д-р техн. наук, доц., МАДИ.

Юхин Иван Александрович, д-р техн. наук, проф., РУДН; РГАТУ.

Андреев Алексей Николаевич, аспирант, МАДИ.

Дьяков Егор Филиппович, студент, МАДИ.

Information about the authors

Alexeev Maxim I., postgraduate, MADI.

Gaevskij Vitaly V., Doctor of Sciences (Technical), professor, MADI.

Asoyan Artur R., Doctor of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Yukhin Ivan A., Doctor of Sciences (Technical), professor, RUDN University; RSATU.

Andreev Alexey N., postgraduate, MADI.

Dyakov Egor Ph., student, MADI.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025; одобрена после рецензирования 11.11.2025; принята к публикации 19.12.2025.

The article was submitted 22.10.2025; approved after reviewing 11.11.2025; accepted for publication 19.12.2025.