

УДК 621.833.65

В.М. Тигарев, канд. техн. наук, В.М. Тонконогий, д-р техн. наук,  
А.А. Гончаренко, бакалавр Одесса, Україна

## **ОБЩИЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНСТРУКЦИИ РАМЫ ЭЛЕКТРОСКУТЕРА И СИМУЛЯЦИИ НАГРУЗОК В САПР INVENTOR**

*Розглянуто загальний підхід к проектуванню та аналізу просторової каркасно-векторної параметричної моделі рами електричного скутера за допомогою САПР Autodesk Inventor Professional. Наведено методика та технологія комп'ютерного моделювання рами електричного скутера. Виконано аналіз для трьох конфігурацій моделі рами електричного скутера на базі методу скінченних елементів. Проведено оптимізація за елементами та матеріалами.*

**Ключові слова:** параметрична модель, рама електричного скутера, комп'ютерне моделювання

*Рассмотрен общий подход к проектированию и анализу нагрузок пространственной каркасно-векторной параметрической модели рамы электрического скутера с помощью САПР Autodesk Inventor Professional. Представлена методика и технология компьютерного моделирования рамы электрического скутера. Выполнен анализ для трех конфигураций модели рамы электрического скутера на базе метода конечных элементов. Проведена оптимизация по элементам конструкции и материалам.*

**Ключевые слова:** параметрическая модель, рама электрического скутера, компьютерное моделирование

*The general design approach and to the analysis of loadings of spatial frame and vectorial parametric model of frame of the electrical scooter by means of a CAD of Autodesk Inventor Professional is considered. The technique and technology of computer simulation of a frame of the electrical scooter is provided. The analysis for three configurations of model of a frame of the electrical scooter on the basis of the finite-element method is made. Optimization on elements of construction and materials is performed.*

**Keywords:** parametric model, electric scooter frame, computer simulation

**Введение.** Электрические транспортные средства необходимо рассматривать как неотъемлемая часть будущих устойчивых транспортных систем в умных городах и районах, в целях эффективного сокращения выбросов углерода и зависимости от ископаемого топлива, а также пробки в основном в городских районах. В поддержку перехода к электрификации транспорта «Парижская декларация о мобильности и изменении климата и призыве к действию» определила цель более чем 100 миллионов электромобилей (электронные автомобили) и 400 миллионов электрических двух- и трехколесных электроскутеров, которые должны быть задействованы в глобальном масштабе к 2030 году.

Основной несущей конструкцией электроскутера является рама. Назначение рамы электроскутера состоит в фиксации двух или более колес в структуру с жесткостью на изгиб и кручение, то есть такую, которая не будет

прогибаться и скручиваться. Рама должна выдерживать все компоненты конструкции, пассажиров и багаж, а также вбирать в себя все действующие на неё нагрузки без чрезмерных отклонений.

**Постановка задания.** Современные компьютерные технологии при проектировании рамы электроскутера позволяют:

- сократить затраты времени
- повысить точность
- создать параметрическую компьютерную модель
- провести анализ механических нагрузок.

Проектирование рамы возможно в разных CAD системах. Пример компьютерной модели рамы спортивного автомобиля представлено в [1], но в этой работе не представлена технология создания модели. Эту задачу удобней решить с помощью САПР Autodesk Inventor Professional, что показано на примере рамы спортивного автомобиля в [2]. САПР Autodesk Inventor Professional позволяет создать параметрическую трёхмерную модель пространственной рамы электроскутера в разделе «Проектирование рам». Параметризация позволяет проводить анализ построенной модели для различных профилей элементов конструкции. Важнейшей целью проектирования рамы должно быть обеспечение безопасности водителя и пассажира, а уже потом её эффективность как конструкции соединения основных узлов электроскутера. Конструкция рамы должна быть эффективной, следовательно, достаточно жёсткой, что также способствует повышению уровня её безопасности. Эти две цели достигаются подобными методами, разница только в местах применения. Для анализа созданной модели рамы необходимо проведение симуляции нагрузок на отдельные элементы и раму в целом для её разных модификаций.

Основы методики и технологии создания трёхмерной параметрической каркасно-векторной модели рамы электроскутера рассмотрены в работах [3 – 6].

Целью данной работы является рассмотрение общего подхода к созданию трёхмерной параметрической каркасно-векторной модели рамы электроскутера и анализа нагрузок на элементы конструкции созданной модели рамы. Для этого необходимо проведение симуляции, распределенной и точечной нагрузок на элементы конструкции рамы.

#### **Результаты исследования.**

При создании модели электроскутера необходимо выполнить модель основной (базовой) части рамы, а затем создать группы элементов, которые позволят укрепить общую надёжность конструкции. Данный метод позволит провести поэтапный анализ конструкции на жёсткость и надёжность.

Технология построения пространственной рамы содержит особенности по сравнению со сборками, выполненными из обычных смоделированных деталей.

1. Для того чтобы модель можно было тестировать в среде «Анализ рам», она должна быть создана из специальных профильных элементов.

2. Для задания стандартного профиля необходимо предварительно созданный эскиз, который добавляется в среду сборки в качестве компонента (профиль задаётся только в среде сборки).

3. Для модели необходимо существование нескольких подуровней детализации (сборка в сборках). Это позволяет расширить свободу контроля над разными компонентами и уровнями детализации.

Методика создания модели рамы состоит из нескольких этапов.

На первом этапе создаём трёхмерную эскиз каркасно-векторной модели рамы, который создан из эскизов модели базовой части рамы, эскизов элементов сиденья и багажника и элементов жёсткости.

На втором этапе проводим профилирование базовой части и поперечных элементов рамы и профилирование элементов жёсткости.

На третьем этапе проводим соединение компонентов в параметрическую трёхмерную модель пространственной рамы.

Для созданной модели проводим анализ механических усилий на раму. Рассмотрим этапы подробно.

Моделирование начинается с создания эскиза основания рамы. Создаём новый локальный проект под названием «Frame». На экране открываются трёхмерная среда детали. Выбирая команды «Создать 2D-эскиз», «Создать 3D-эскиз» и добавляя вспомогательные плоскости построения создаём элементы эскиза, задавая с помощью размеров необходимые параметрические зависимости. Эскиз основы рамы электроскутера представлен на Рисунке 1.

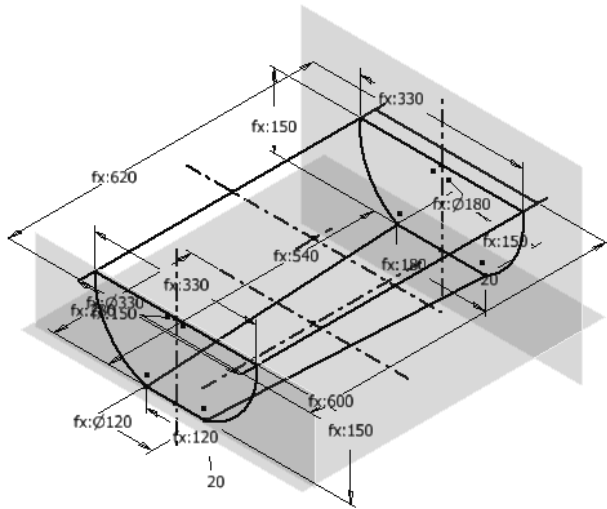


Рисунок 1. Эскиз основы рамы электроскутера

Добавляем эскизы для сиденья водителя, багажник и крепление руля. Объединяем их в один эскиз (Рисунок 2).

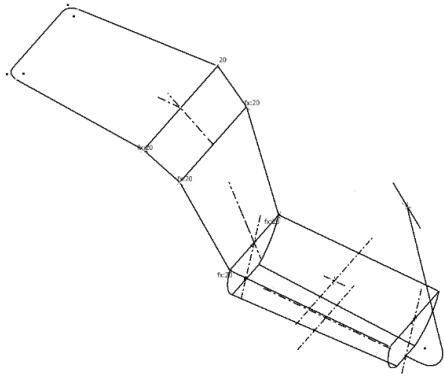


Рисунок 2. Эскиз модели рамы без ребер жёсткости.

Полученная линейная рама полностью соответствует заданию, предложенному заказчиком, следовательно, это только исходные данные для дальнейшей доработки. В конструкции не хватает элементов жёсткости, в данном виде она чувствительна к нагрузкам. Наиболее подходящим для пространственной рамы будет введение диагональных инсталляций в конструкцию. Для реализации поставленной задачи, создаём модели инсталляций в отдельном файле .ipt, что позволит добавлять их в новые конфигурации рамы. Для каждого из следующих компонентов используем копию ранее смоделированной эскизной рамы для более удобного задания зависимостей в финальной сборке.

Элементами жёсткости сделаем боковые подпорки задней секции рамы для поддержки багажной части. Для этого открываем копию эскизной рамы и проведем диагональные линии в выбранной нами локации (Рисунок 3).

Созданный эскиз является каркасно-векторно-параметрическим потому, что он:

1. Создан с помощью простейших каркасных элементов.
2. Каркас векторный потому, что направления создания элементов каркаса будет использоваться при их профилировании.
3. Каркас параметрический потому, что все размеры связаны и размещаются в таблице параметров эскиза.

Создаем трехмерную модель на основе каркасно-векторной модели. Последним шагом моделирования будет создание главного файла сборки. В нём будет проведено профилирование основания рамы и присоединения всех необходимых компонентов.

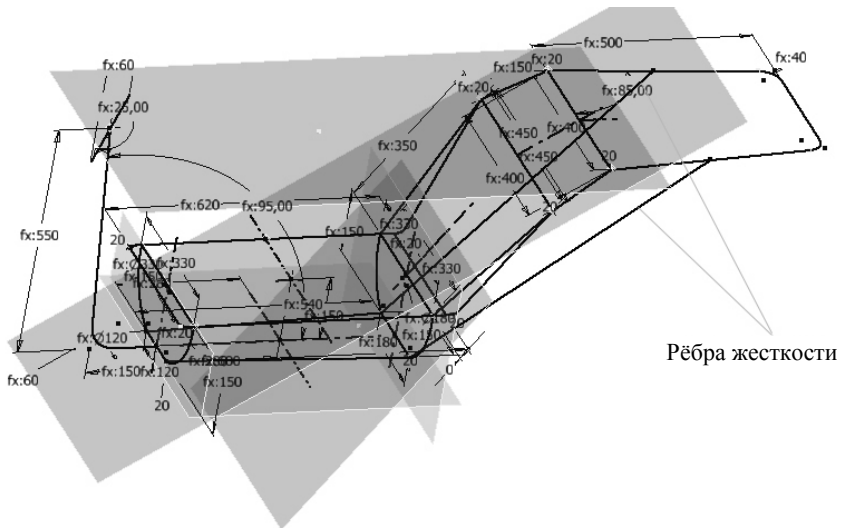


Рисунок 3. Окончательный вид эскиза модели.

Открываем шаблон .iam, и вставляем раму, она будет фиксированным компонентом. Присоединение профилей происходит одинаково для всех элементов (Рисунок 4).

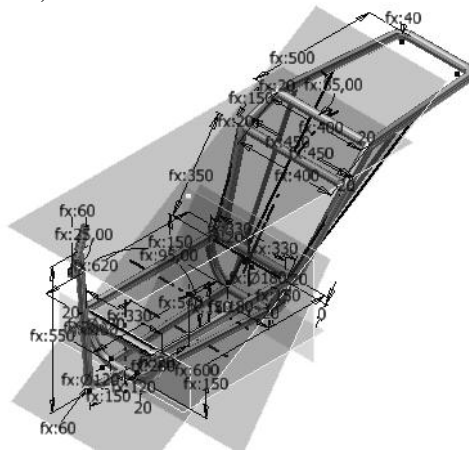


Рисунок 4. Основная часть рамы (объёмная)

Вставляем созданные инсталляции, пользуясь зависимостью типа «Совмещение» по совпадению точки и прямой. В окончательном виде рама будет иметь все существующие элементы (Рисунок 5).

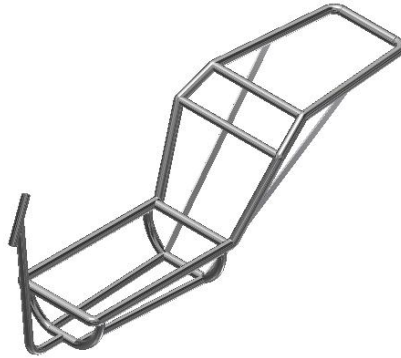


Рис. 5 Окончательный вид рамы (эскизы скрыты)

В системе Autodesk Inventor «Анализ рам» используется для исследования структурной целостности рамы по отношению к деформации и напряжениям, которые возникают под действием нагружения и заданием зависимостей. После задания критериев можно запустить процесс симуляции и увидеть поведение модели в заданных условиях. Симуляция помогает определить проблемы при работе и подобрать для проектов лучшие альтернативные решения.

Балочные элементы являются линейными. Процедура анализа рам не может выполняться по отношению изогнутых балок. По этой причине изогнутые балки система разделяет на небольшие прямолинейные отрезки.

В начале и конце балки каждый балочный элемент имеет шесть ступеней свободы (три вращательных степени свободы и три степени свободы смещения). Узлы на балках определяют важные точки структуры. Например, их можно использовать для задания нагрузок. В модальном анализе узлы могут использоваться для концентрации массы.

В анализе рам существуют следующие ключевые функции:

- структурный статический и модальный анализ одного или нескольких симуляций;
- автоматические адаптивные элементы для контроля точности результатов;
- широкий выбор граничных условий (нагрузок и зависимостей);
- экстенсивные функции, используемые после обработки, для просмотра результатов в режиме 3D и публикации отчётов в Интернете.

При запуске процедуры анализа рам модель сборки генератора рам автоматически преобразуется в балки и узлы. Из выходной модели считывается следующая информация:

- данные про сечения балок;
- материалы, из которых изготовлены балки;

- проверяются ссылки на граничные условия;
- начальные и конечные точки балок соединяются с заданным допуском;
- в отчёте отмечаются несоответствия материалов или неправильные параметры поперечных сечений

Рассмотрим рабочий процесс анализа структуры рамы с использованием процесса «Анализа рам» в Inventor. Открываем сборку, которая содержит компоненты рамы, созданные с помощью инструментов генератора рам.

1. Входим в среду «Анализа рам».
2. Выбираем команду "Создать симуляцию".
3. Настраиваем параметры симуляции. Модель балки автоматически преобразуется в идеальные узлы и балки, предназначенные для выполнения структурного анализа. В графическом окне отображаются балки, узлы и значки центра тяжести. В папке "Статус" браузера показаны несоответствие материалов и некорректные поперечные сечения балок.
4. Исключаем балки и граничные состояния, которые не должны быть задействованы в симуляции.
5. Указать параметры материалов и физические свойства балок, которые берут участие в анализе.
6. Определяем и накладываем зависимости.
7. Определяем место и величину нагрузок.
8. Оцениваем соединения и при необходимости задаем их.
9. Запускаем симуляцию.
10. Просматриваем результаты.
11. Вносим необходимые изменения для усовершенствования сборки. Изменения могут представлять собой добавление узлов, нагрузок и зависимостей или отключение проблематичных узлов, нагрузок и зависимостей.
12. Повторно запускаем симуляцию, чтобы обновить результаты.
13. Повторяем процесс до тех пор, пока компонент не будет оптимизирован.
14. После завершения создаём отчёты на основе полученных результатов.

Первой была исследована рама грузовой конфигурации без ребер жесткости, начальным материалом будет алюминий. Деформации при нагружении на багажную часть рамы для такой конструкции не удовлетворяют требованиям по жёсткости конструкции (Рисунок 6). При отсутствии ребер жёсткости (Рисунок 6а) большое смещение багажного отделения. Необходимо добавить ребра жёсткости и заменить материал на более прочный. Повторили симуляцию с ребрами жесткости и материалом – сталь (Рисунок 6б).

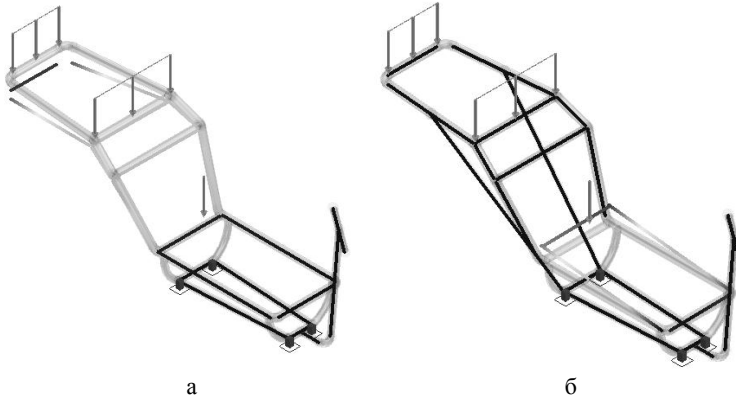


Рисунок 6. Первая конфигурация рамы – нагрузка на багажной части рамы  
а) – без ребер жёсткости, б) – с ребрами жесткости

Проводим следующий анализ для этой рамы – боковая нагрузка (рис. 7). Возникают недопустимые деформации, но это уже кручение.



Рисунок 7. Первая конфигурация рамы – боковая нагрузка

Более критичными являются деформации смещения, следовательно, необходимо обязательно установить ребра жесткости и заменить материал. После этого проводим для них аналогичные симуляции.

Следующей конфигурацией скутера будет конфигурация для грузопассажирских перевозок. Она потребовала изменения материала с алюминия на сталь, при этом не нужны ребра жёсткости (Рисунок 8).

Третьей была пассажирская конфигурация скутера. Она наименьшая из представленных конфигураций. Отличием от предыдущих были размеры и форма багажного отделения, место перед водителем, для неё проводим аналогичный анализ, как и для предыдущих конфигураций модели. В результате проведения анализа данной рамы не было выявлено отклонений от нормы поэтому необходимости в элементах жёсткости и замены материала нет.



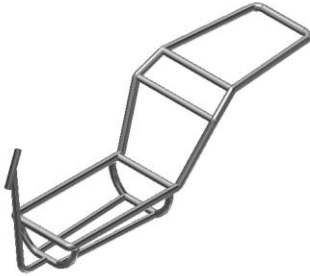


Рисунок 8. Грузопассажирская конфигурация рамы

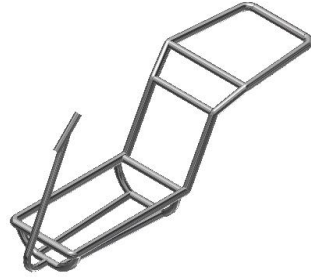


Рисунок 9. Пассажирская конфигурация рамы

В результате анализа были выявлены отклонения в первой и второй конфигурации рамы, что потребовало добавления элементов жёсткости и альтернативного материала изготовления для поддержки багажного отдела.

При использовании стали почти не изменился характер деформаций, но на несколько пунктов изменилась её амплитуда. При сравнении алюминия со сталью амплитуды деформаций в 2,5 раза больше, но их характер не изменяется. Рама из алюминия имеет значительно меньший вес: 17,4 кг из алюминия против 30,5 кг из стали. Алюминий является компромиссным материалом, который подойдет для нашей рамы. Он относительно дешёвый и легко сваривается (экономичность, лёгкость монтажа), он достаточно легкий и имеет достаточный запас мощности (характер деформаций не изменился). Мы провели оптимизацию конструкции рамы для её различных конфигураций.

Результаты симуляции можно представить в виде отчета, в котором будет содержаться информация в виде эпюр и диаграмм (Рисунок 10), а также в табличном виде (таблицы 1, 2).

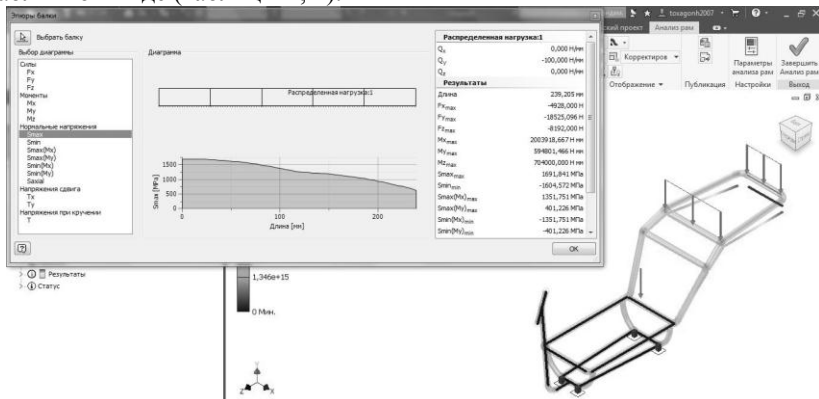


Рисунок 10. Диаграмма при распределённой нагрузке на раму

Таблица 1 Сила и момент реакции в опорах

| Имя опоры                    | Сила реакции |                       | Реактивный момент |                       |
|------------------------------|--------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
|                              | Величина     | Компоненты (Fx,Fy,Fz) | Величина          | Компоненты (Mx,My,Mz) |
| Шарнирно-неподвижная опора:2 | 3,717 Н      | 0,000 Н               | 0,000 Н<br>мм     | 0,000 Н мм            |
|                              |              | 3,717 Н               |                   | -0,000 Н мм           |
|                              |              | 0,000 Н               |                   | 0,000 Н мм            |
| Шарнирно-неподвижная опора:3 | 3,717 Н      | -0,000 Н              | 0,000 Н<br>мм     | -0,000 Н мм           |
|                              |              | 3,717 Н               |                   | -0,000 Н мм           |
|                              |              | 0,000 Н               |                   | 0,000 Н мм            |
| Шарнирно-неподвижная опора:4 | 6,795 Н      | 0,000 Н               | 0,000 Н<br>мм     | -0,000 Н мм           |
|                              |              | 6,795 Н               |                   | 0,000 Н мм            |
|                              |              | -0,000 Н              |                   | -0,000 Н мм           |
| Шарнирно-неподвижная опора:1 | 6,795 Н      | -0,000 Н              | 0,000 Н<br>мм     | -0,000 Н мм           |

Таблица 2 Сводка по статическому результату

| Имя                     |          | Минимальная       | Максимальная               |
|-------------------------|----------|-------------------|----------------------------|
| Смещение                |          | 0,000 мм          | 1,83838744499290E+11<br>мм |
| Силы                    | Fx       | -48,006 Н         | 63,994 Н                   |
|                         | Fy       | -7,117 Н          | 87,957 Н                   |
|                         | Fz       | -20,000 Н         | 13,337 Н                   |
| Моменты                 | Mx       | -4542,257 Н<br>мм | 3604,836 Н мм              |
|                         | My       | -1700,650 Н<br>мм | 767,357 Н мм               |
|                         | Mz       | -284,912 Н мм     | 685,425 Н мм               |
| Нормальные напряжения   | Smax     | -0,012 МПа        | 5,760 МПа                  |
|                         | Smin     | -5,922 МПа        | 0,043 МПа                  |
|                         | Smax(Mx) | 0,000 МПа         | 4,363 МПа                  |
|                         | Smin(Mx) | -4,363 МПа        | -0,000 МПа                 |
|                         | Smax(My) | 0,000 МПа         | 1,633 МПа                  |
|                         | Smin(My) | -1,633 МПа        | -0,000 МПа                 |
|                         | Saxial   | -0,105 МПа        | 0,172 МПа                  |
| Напряжения сдвига       | Tx       | -1,004 МПа        | 0,753 МПа                  |
|                         | Ty       | -1,379 МПа        | 0,112 МПа                  |
| Напряжения при кручении | T        | -0,329 МПа        | 0,137 МПа                  |

Полный отчет содержит результаты испытаний по все узловым точкам, опорам и элементам конструкции с учётом материалов и содержит более 50 страниц информации.

## Выводы.

В работе предложен общий подход к проектированию и анализу нагрузок пространственной каркасно-векторной параметрической компьютерной модели несущей конструкции (рамы) электрического скутера с помощью САПР Autodesk Inventor Professional. Представлена методика и технология компьютерного моделирования рамы электрического скутера. Выполнен анализ для трех конфигураций модели рамы электрического скутера на базе метода конечных элементов. На основе проведенных исследований была проведена оптимизация конструкции рамы по элементам конструкции и материалам. Используя предложенный подход можно сократить время ресурсы, а также повысить надежность создаваемого изделия. Развитием данной работы будет создание полной компьютерной модели электрического скутера и проведение испытаний на возможные статические и динамические воздействия.

**Список использованных источников:** 1. S.V. Rusnak, V.V. Khamray, M.A. Novak. Computer simulation and calculation of a sporting car frame. / Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса, 2012. – Вип. 2(39). – С 101-103. 2. В.М. Тонконогий, В.М. Тігарев, К.В. Козирева. Розробка параметричної тривимірної моделі просторової рами автомобіля. // Сучасні технології в машинобудуванні. – Вип. 9, Харків, НТУ "ХПІ", 2014, – С. 216-228. 3. В.М. Тігарев, А.А. Гончаренко Методика створення трьохмерної параметричної моделі рами електроскутера. // VIII Міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених «Modern Information Technology 2018»; ОНПУ; ІКС. – Одеса :Екологія, 2018. – С. 146-147. 4. Пурич Д.А., Савельєва О.С., Тонконогий В.М. Експрес-аналіз структурної надійності складних технічних систем с нагуженим резервуванням. // Збірник наукових праць «Сучасні технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – Випуск 8. – С. 272 – 280. 5. Становський А.Л., Тонконогий В.М., Савельєва О.С. Моделювання откazoустойчивости в САПР складних технічних систем. // Резаніє і інструмент в технологічних системах. – Харьков: ХПИ, 2007. – Вып. 73. – С. 290 – 295. 6. В.М. Тігарев, А.О.Гончаренко, А.А. Медведєв Розробка технології створення та аналізу параметричної моделі рами електроскутера. // VIII міжнародна науково-практична конференція. – Чернігів: ЧНТУ, 2018. – Т.2. – С. 128 – 129.

**Bibliography (transliterated):** 1. S.V. Rusnak, V.V. Khamray, M.A. Novak. Computer simulation and calculation of a sporting car frame. / Praci Odeskogo politehnichnogo universitetu: Naukovij ta naukovo-virobnichij zbirnik. – Odesa, 2012. – Vip. 2(39). – S 101-103. 2. V.M. Tonkonogij, V.M. Tigaryev, K.V. Koziryeva. Rozrobka parametrichnoyi trivimirmoyi modeli prostorovoyi rami avtomobilya. // Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni. – Vip. 9, Harkiv, NTU "HPI", 2014, – S. 216-228. 3. V.M. Tigarev, A.A. Goncharenko Metodika stvorenniya tryohmernoji parametricheskoji modeli rami elektroskutera. // VIII Mizhnarodna naukova konferenciya studentiv ta molodih vchenih «Modern Information Technology 2018»; ONPU; IKS. – Odesa :Ekologiya, 2018. – S. 146-147. 4. Purich D.A., Saveleva O.S., Tonkonogij V.M. Ekspress-analiz strukturnoj nadezhnosti slozhnyh tehniceskijh sistem s nagruzhennym rezervirovaniem. // Zbirnik naukovih prac «Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni». – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – Vipusk 8. – S. 272 – 280. 5. Stanovskij A.L., Tonkonogij V.M., Saveleva O.S. Modelirovanie otkazoustojchivosti v SAPR slozhnyh tehniceskijh sistemah. // Rezanie i instrument v tehnologicheskijh sistemah. – Harkov: HPI, 2007. – Vyp. 73. – S. 290 – 295. 6. V.M. Tigaryev, A.O.Goncharenko, A.A. Myedvedyev Rozrobka tehnologiyi stvorenniya ta analizu parametrichnoyi modeli rami elektroskutera. // VIII mizhnarodna naukovo-praktichna konferenciya. – Chernigiv: ChNTU, 2018. – T.2. – S. 128 – 129.

Надійшло до редколегії 25.06.2018