

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГУСЕНИЧНОГО ХОДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН

Введение. Гусеничный ход является наиболее распространенным ходовым оборудованием для такого класса землеройных машин как строительные и карьерные одноковшовые экскаваторы. Существенные отличия в условиях работы от гусеничных транспортных машин [1,2], такие, как, небольшая скорость перемещения (до 5 км/ч), значительная масса, жесткое соединение опорных катков к раме и др., привели к возникновению научных разработок и целого ряда научных школ в этом направлении [2,4]. Однако, несмотря на большое количество исследований, существует ряд вопросов, решение которых имеет интерес как с точки зрения теории гусеничного хода землеройных машин, так и с точки зрения инженерной практики. Одним из таких вопросов является кинематические и силовые взаимодействия элементов гусеничного хода между собой и внешней средой (опорной площадкой) с учетом пространственной геометрии и структуры, параметров жесткости, физико-механических характеристик опорной поверхности грунта.

Постановка задачи. В данной работе ставится задача создания алгоритма и программного обеспечения для моделирования силового взаимодействия гусеничных элементов экскаваторов между собой, опорной площадкой грунта и опорными катками с учетом пространственной геометрии и кинематики.

Анализ литературных источников. Вопросам исследования формирования нагрузок на элементы гусеничного хода, выявлению условий взаимодействия гусеницы с опорной площадкой грунта, как в процессе выполнения основного технологического процесса, так и во время передвижения, посвящено множество научных работ и исследований [1-6]. Основными причинами выхода из строя гусеничных звеньев экскаваторов является износ и поломки. Износ наиболее характерен для класса строительных экскаваторов [4]. Для карьерных экскаваторов наиболее распространенной проблемой является поломки и вытяжка гусеничных звеньев. Причем следует отметить, что основным режимом работы экскаватора является разработка грунта, а на передвижение затрачивается 5-10% рабочего времени.

Анализ доступных источников показал, что при исследовании параметров силового и кинематического взаимодействия опорной части гусеничной ленты с грунтом и катками принимается ряд серьезных допущений. Так при оценке давления на грунт опорная часть гусеничной ленты представляется либо в виде гибкой ленты [3], либо в виде жесткой плиты [2].

При исследовании нагрузок на гусеничные элементы и катки, ограничиваются рассмотрением плоских расчетных схем, состоящих из нескольких абсолютно жестких звеньев.

Перечисленные выше допущения затрудняют исследование как нагрузок на гусеничные звенья и опорные катки, так и колебательные процессы гусеничных звеньев при перемещении по ним катков, приводящие к износу проушин.

Изложение материала. Ходовое оборудование экскаватора (рис. 1) представляет собой конструкцию, состоящую из таких основных элементов, как нижняя рама 1,

гусеничная рама 2, катки 3, гусеничная лента 4 и привод. На рисунке 2 приведена структурная схема гусеничного хода, состоящая из блоков: НР – нижняя рама, гусеничные рамы ГР1 и ГР2, катков К_і, гусеничных звеньев Т_і, шарниров Ш_і, связей с опорной поверхностью грунта С_і. Элементы структурной схемы имеет упругие и упруго-вязкие (грунт) связи. Связи катков – гусеничное звено и гусеничное звено – грунт не является стационарными, и зависят от текущего состояния системы (положения катков, расположения гусеничного звена относительно опорной площадки).

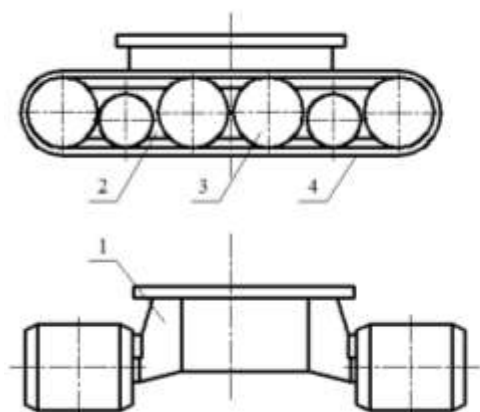


Рис. 1. Компонентная схема гусеничного механизма передвижения экскаватора

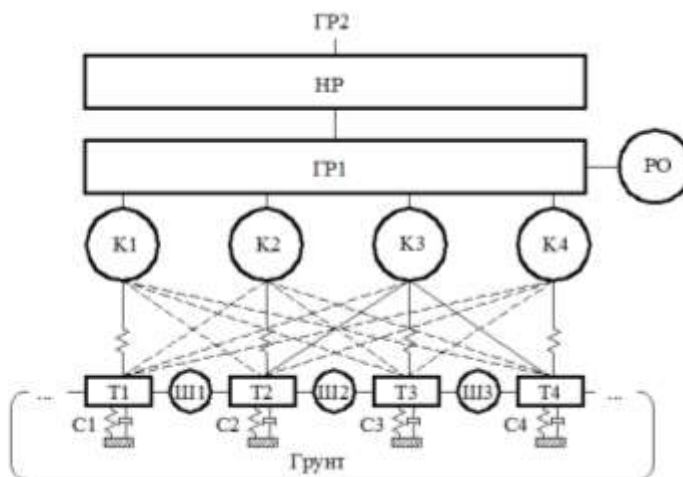


Рис. 2. Структурная схема гусеничного механизма передвижения экскаватора

Каждый элемент структурной схемы представляет собой пространственную конструкцию с заданными физико-механическими параметрами и ограничениями. Кроме того, особенностью взаимодействия системы «грунт - гусеничная лента – катки» является изменение расчетной схемы в зависимости от наличия связей с опорной площадкой каждого звена, контакта с опорным катком и ориентации в пространстве.

Как показывает практика, при моделировании сложных систем целесообразно использовать объектно-ориентированный подход, что позволяет: упростить как разработку, так и программирование модели; дополнять при необходимости более точными данными о функционировании и получать более детальное описание работы; отслеживать, фиксировать и вмешиваться в работу модели в любой момент времени; модернизировать взаимосвязи между элементами для моделирования различных ситуаций.

Процесс работы гусеничного движителя будем описывать совокупностью математических моделей элементов, формирующих состояние системы в определенный момент времени и моментов переходов между ними. Этот метод конструирования модели системы и проведения теоретического эксперимента получил название «имитационное моделирование».

Состояние системы в момент времени определяют как совокупность значений определенных параметров системы в этот самый момент времени. Любое изменение этих параметров системы можно рассматривать как переход к другому состоянию. Информация о имитационной модели имеет логико-математический характер и подается в виде совокупности алгоритмов (подпрограмм), которые описывают процесс функционирования системы.

С математической точки зрения имитационную модель можно рассматривать как совокупность уравнений, которые разрешают с использованием численных методов в случае каждого изменения модельного времени. Решение таких уравнений во время

имитационного моделирования означает установление хронологии последовательности событий, которые возникают в системе и отображают последовательность ее состояний. Таким образом, имитационная модель функционирует так же само, как и система.

В базовом алгоритме имитационной модели для определения перемещений и усилий в элементах был использован метод конечных элементов (МКЭ). Система уравнений для каждого элемента имеет вид

$$[K]\{U\} = \{P\},$$

где K – матрица жесткости элемента системы, определяемая как сумма $[K] = \sum_i [I_i^{(e)}][k_i^{(e)}]$, здесь $[k_i^{(e)}]$ – матрица жесткости конечного элемента; $[I_i^{(e)}]$ – матрица соответствия. $\{U\}$ – вектор неизвестных перемещений; $\{P\}$ – вектор внешних нагрузок.

Матрица жесткости изопараметрических элементов вычисляется как

$$k^{(e)} = \iiint_V [B]^T [D][B] dV = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D][B] \cdot \det[J] dr ds dt,$$

где $[B]$ – матрица дифференцирования; $[D]$ – матрица упругости; $[J]$ – матрица Якоби, связывающая локальные и естественные координаты.

Матрица жесткости стержневых элементов строится исходя из функционала полной потенциальной энергии

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} \int_0^L \left[EI_y(x) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + EI_z(x) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 + EA(x) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + GI_{kp}(x) \alpha^2 \right] dx - \\ & - \int_0^L [p_x(x)u + p_y(x)v + p_z(x)w + m_x \alpha + m_y \beta + m_z \gamma] dx, \end{aligned}$$

где u, v, w – линейные перемещения по области стержня вдоль осей x, y, z ; α, β, γ – угловые перемещения по области стержня относительно осей x, y, z ; E – модуль упругости материала; $I_y(x), I_z(x), I_{kp}(x)$ – моменты инерции сечения стержня относительно осей y, z и x .

Вектор внешних нагрузок определяется как

$$\{P\} = \sum_i [I_i^{(e)}] \left\{ \{p_V^{(e)}\} + \{p_S^{(e)}\} + \{p_\varepsilon^{(e)}\} + \{f_k^{(e)}\} \right\},$$

где $\{p_V^{(e)}\}, \{p_S^{(e)}\}, \{f_k^{(e)}\}, \{p_\varepsilon^{(e)}\}$ – объемные, поверхностные, сосредоточенные нагрузки и нагрузки от деформаций, приведенные к узловым для каждого конечного элемента.

Общий вид программы с загруженной моделью механизма передвижения ЭКГ-10 представлен на рис. 3.

Укрупненная блок-схема программы представлена на рис. 4. Особенностью программы является разделение на исполняемое ядро, в котором находятся базовые ресурсоемкие функции и интерпретатор (виртуальная машина LUA).

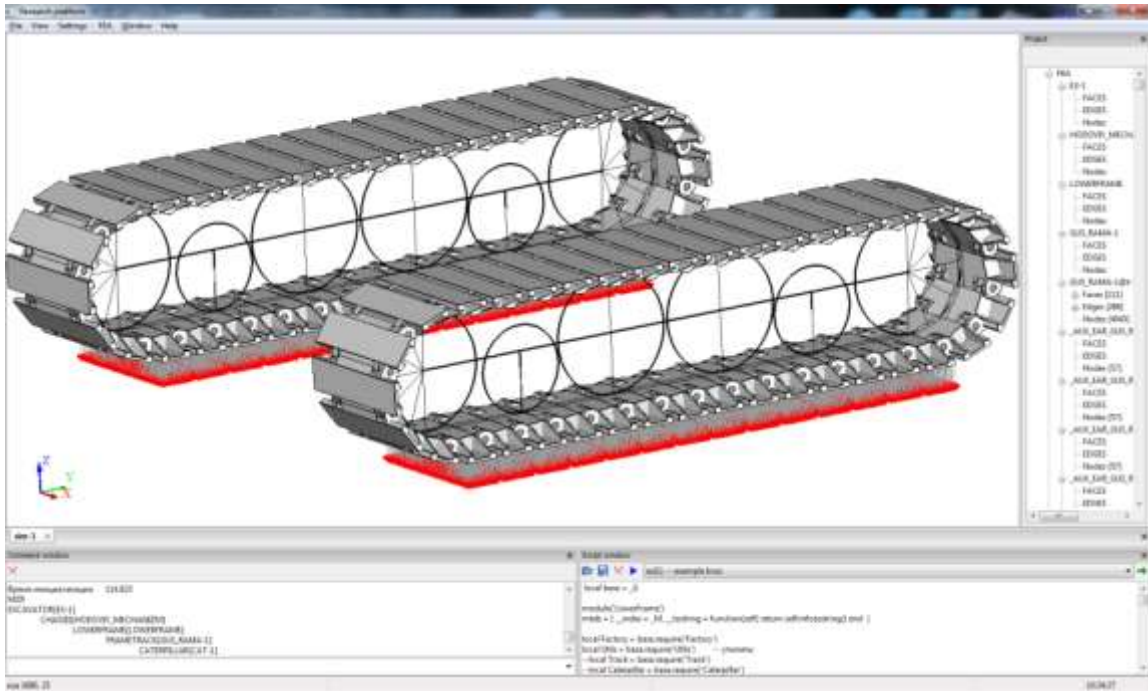


Рис. 3. Общий вид программы моделирования

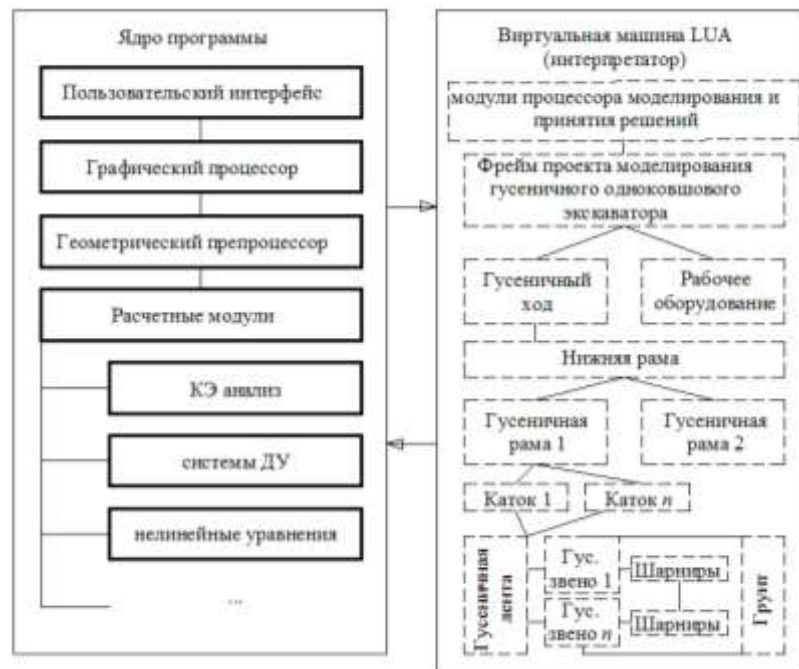


Рис. 4. Блок-схема программы

Так как скриптовый язык LUA поддерживает основные принципы объектно-ориентированного программирования и работает в симбиозе с исполняющей программой, программное описание иерархической модели гусеничного хода экскаватора осуществляется с помощью этого языка. На рис. 4 пунктирной линией отмечены блоки-модули, описанные в виде текстовых файлов на языке LUA.

Данный подход позволяет легко наращивать структуру, функциональность, логику и сложность модели без перекомпиляции основной программы.

Для создания расчетной схемы гусеничного механизма в программу подается информация о линейных размерах, геометрических характеристик элементов, а также файл данных о узлах и связях конечных элементов, описывающих гусеничные звенья.

Работа программы начинается с препроцессора, задача которого подготовить расчетную схему, при этом выполняются этапы (см. рис. 5):

1) На основе данных о дискретизации модели гусеничного звена выполняется автоматическая разметка и анализ поверхностей модели, определяются параметры цилиндрических отверстий, рассчитывается шаг звена и другие параметры, необходимые как для визуализации, так и для расчета. Пример результата работы геометрического препроцессора показан на рис. 5. *а*.

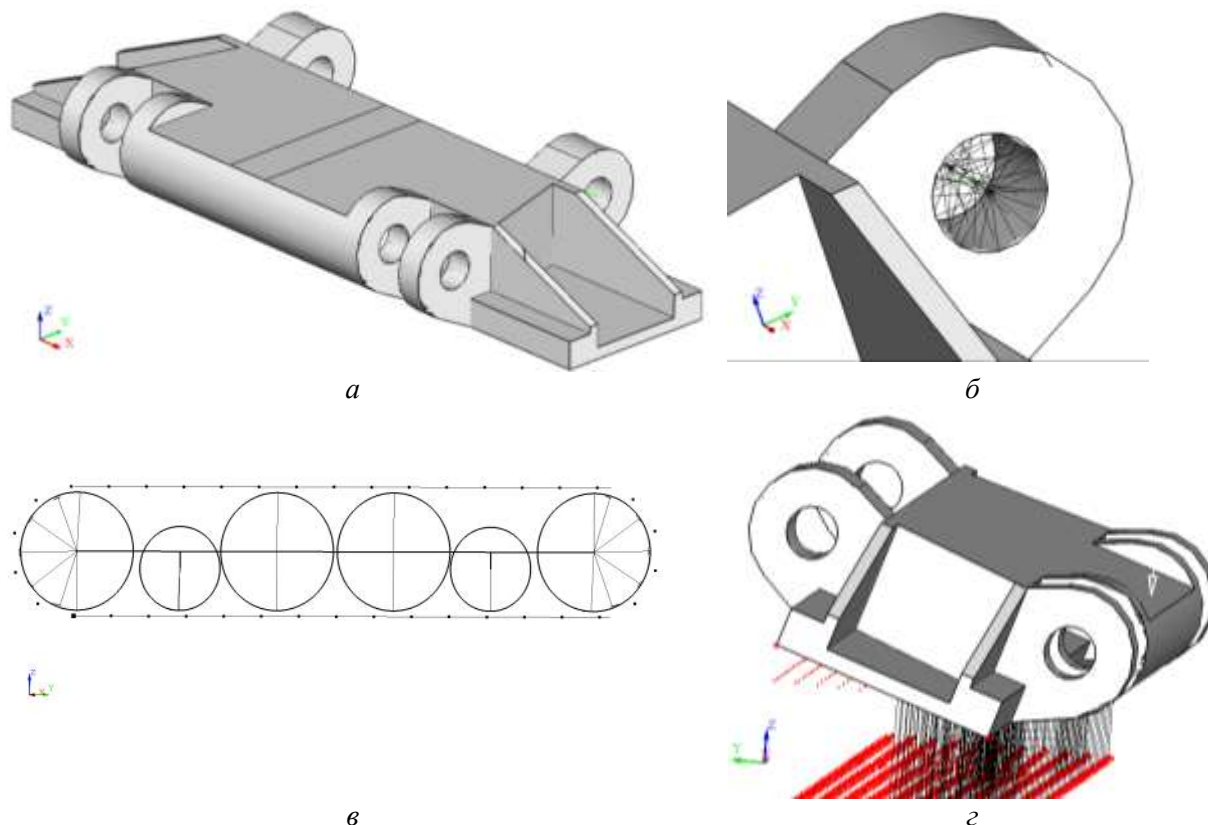


Рис. 5. Элементы моделей

2) Для цилиндрических поверхностей, которые указаны в конфигурации, формируются модели проушин (рис. 5. *б*). Модель проушины представляет собой ось (стержневой конечный элемент, воспринимающий продольные, поперечные силы и изгибающие моменты). Параметры жесткости стержневого элемента оси соответствуют жесткости соединительного пальца. Для передачи нагрузок от узлов поверхности проушины до конечного элемента оси вводятся промежуточные шарнирные стержневые элементы.

Для совместной работы гусеничных звеньев в составе гусеничной ленты выполняется объединение линейных и угловых перемещений соответствующих моделей проушин. Следует отметить, что итерационный расчет исключает из расчетной схемы растянутые стержни.

3) На основании входных данных (размеров и расположения опорных и поддерживающих катков), а также результатов работы подпрограмм из п.1-2 формируется разметка первоначального расположения осей проушин по обводу цепи (рис. 5. *б*). Участки обвода между звеньями могут быть заданы как прямолинейными, так и криволинейными

ми второго порядка с заданной кривизной. Это позволяет задать первоначальную форму дуги провисания ленты, которая уточняется в результате итерационного расчета.

4) Передача нагрузок со стороны рамы на гусеничные звенья осуществляется стержневыми элементами эквивалентной жесткости. Точки контакта с поверхностью гусеничных звеньев зависят от текущего расположения гусеничной рамы относительно гусеничной ленты и ориентации звеньев в пространстве (рис. 5. в).

5) Моделирование реакции со стороны грунта на опорную площадку звеньев осуществляется стержневыми элементами (рис. 5. з). Стержни, воспринимающие растягивающие нагрузки и не прошедшие проверку на наличие контакта исключаются из расчетной схемы. Итерационный расчет прекращается при наличии только сжатых стержней.

Жесткость стержневых элементов, моделирующих грунт, назначается в зависимости от коэффициента сопротивления грунтов смятию k , даН/м³ следующим образом:

а) Вычисляется площадь опорной поверхности, приходящаяся на каждый стержневой элемент исходя из формулы расчета поверхностных нагрузок

$$\{f_q\} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 H^T \cdot \bar{q} \, ds,$$

где H^T – функции формы конечного элемента; \bar{q} – интерполяция поверхностных нагрузок при помощи функций форм, $\bar{q} = \sum_{i=1} H \cdot q_L$, здесь q_L – узловые значения поверхностных нагрузок.

Приняв величину давления за единичную, вектор $\{f_q\}$ будет содержать удельное значение площади рассматриваемой стороны конечного элемента, т.е. $\sum f_q^i = 1$. Умножив удельные значения на площадь поверхности и просуммировав по всем поверхностям элементов, получим площади опорной поверхности, приходящиеся на каждый конечный элемент имитирующий грунт.

б) Вычисляется жесткость каждого стержневого элемента по формуле

$$C_i = A_i \cdot k',$$

где A_i – площадь опорной поверхности, приходящаяся на i -й элемент; k' – коэффициент сопротивления грунтов смятию, который в общем случае зависит от истории нагружения.

Гусеничные и нижняя рама моделируются стержневыми конечными элементами эквивалентной жесткости.

Приведенная на рисунке расчетная схема имеет более 400000 неизвестных. Учитывая наличие итерационных вычислений изложенные выше принципы позволяют уйти от контактных трехмерных задач (для поставленной задач) и сократить время моделирования до приемлемых значений.

В некоторых случаях эффективной с точки зрения минимизации размерности задачи может быть замена расчетных некоторых звеньев (например, холостой ветви) эквивалентными по жесткости стержневыми элементами или формирование из модели трака суперэлемента (рис. 6.). Суперузлами могут выступать узлы, принадлежащие поверхностям, контактирующими с грунтом, катками и проушинам.

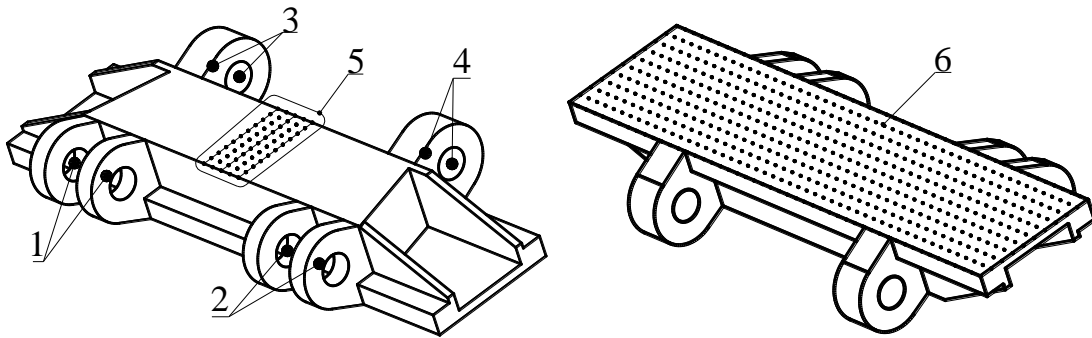


Рис. 6.Схема расположения суперузлов

В качестве примера функционирования программы и работы основных алгоритмов рассмотрен процесс нагружения части гусеничной ленты из 13 звеньев активной сосредоточенной нагрузкой в 10 кН. При этом масса одного звена составляет 450 кг, площадь опорной поверхности $0,56 \text{ м}^2$, шаг звена 445 мм.

В результате работы программы моделирования, блок-схема которой приведена на рис. 4, были рассчитаны перемещения гусеничных звеньев (углы поворота представлены на рис. 8), реакции в проушинах и распределение давления на грунт. Изменение длины цепи в результате поворота звеньев составляет порядка 10 мм, однако в данном эксперименте не учтены силы трения в шарнирах и в зоне контакта с грунтом.

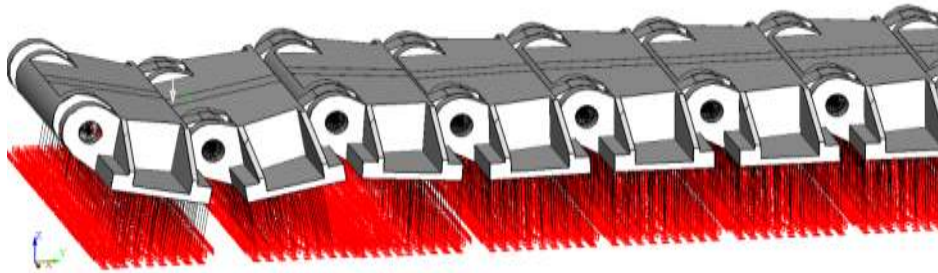


Рис. 7.Визуализация результата нагружения

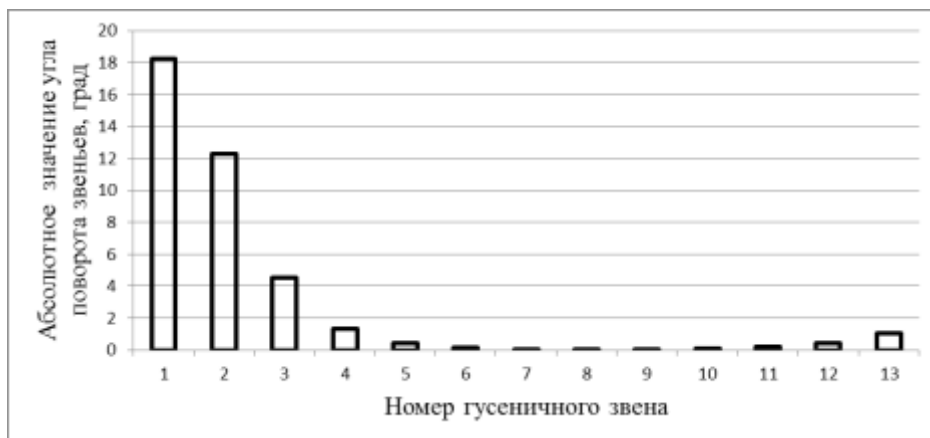


Рис. 8. Гистограмма угловых перемещений гусеничных звеньев

Выводы. Приведенный алгоритм построения моделей позволяет изучать работоспособность элементов гусеничного хода с учетом их геометрических и жесткостных параметров. Представленное программное обеспечение может быть использовано при исследованиях процессов нагружения элементов гусеничного хода с учетом влияния

как нагрузок со стороны рабочего оборудования, так и условий опирания о грунт с заданными физико-механическими характеристиками

Литература: 1. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность–машина / М.Г. Беккер Под ред. В.В. Гуськова – М.: Машиностроение, 1973.– 520 с. 2. Домбровский Н.Г. Теория и расчет гусеничного движителя землеройных машин / Н.Г. Домбровский, А.Г. Маевский, И.М. Гомозов, В.М. Гилис.–К.: Техніка, 1970, 192 с. 3. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин / Н.А. Забавников – М.: Машиностроение, 1975.– 448 с 4 Рейш А.К. Повышение износостойкости строительных и дорожных машин / А.К. Рейш. – М.: Машиностроение, 1986.–184 с5. Григоров О.В. Современные гусеничные краны. Анализ. Перспективы / О.В.Григоров, О.П.Водченко // Збірник наукових праць НТУ «ХПИ»(Високітехнології в машинобудуванні). – Харків, 2006. 6. Водченко О.П. Крановый гусеничный движитель. Теория и Практика преодоления препятствий / О.П. Водченко// Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2010. – №49. – с. 75-80.

Bibliography (transliterated): 1. Bekker M.G. Vvedenie v teoriju sistem mestnost'–mashina / M.G. Bekker Pod red. V.V. Gus'kova – M.: Mashinostroenie, 1973.– 520 s. 2. Dombrovskij N.G. Teorija i raschet gusenichnogo dvizhitelja zemlerojnyh mashin / N.G. Dombrovskij, A.G. Maevskij, I.M. Gomošov, V.M. Gilis.–K.: Tehnika, 1970, 192 s. 3. Zabavnikov N.A. Osnovy teorii transportnyh gusenichnyh mashin / N.A. Zabavnikov – M.: Mashinostroenie, 1975.– 448 s 4 Rejsh A.K. Povyshenie iznosostojkosti stroitel'nyh i dorozhnyh mashin / A.K. Rejsh. – M.: Mashinostroenie, 1986.–184 s 5. Grigorov O.V. Sovremennye gusenichnye kраны. Analiz. Perspektivy / O.V.Grigorov, O.P.Vodchenko // Zbirnik naukovih prac' NTU «HPI»(Visokitehnologii v mashinobuduvanni). – Harkiv, 2006. 6. Vodchenko O.P. Kranovyj guse-nichnyj dvizhitel'. Teorija i Praktika preodolenija prepjatstvij / O.P. Vodchenko// Vestnik nacional'nogo tehničeskogo universiteta «HPI». – 2010. – №49. – s. 75-80.

Койнаш В.О., Крупко В.Г.

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ГУСЕНИЧНОГО ХОДОВОГО ОБЛАДНАННЯ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН

На основі принципів імітаційного моделювання запропонований алгоритм і програмне забезпечення для дослідження навантажень в елементах гусеничного ходу землерійних машин.

Койнаш В.А., Крупко В.Г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГУСЕНИЧНОГО ХОДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН

На основе принципов имитационного моделирования предложен алгоритм и программное обеспечение для исследования нагрузок в элементах гусеничного хода землеройных машин.

Koynash V.A., Krupko V.G.

SIMULATION OF WORK OF CATERPILLAR WORKING EQUIPMENT OF EARTHMOVERS

On the basis of principles of imitation design an algorithm and software are offered for research of loading in the elements of caterpillar motion of earthmovers.
