

УДК 621.87:658.512.011.56

## КОДИРОВКА ТРАКОВ В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ

**И. В. ЛЕСКОВЕЦ**

*Государственное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет»,  
г. Могилев*

### **Введение**

С развитием новых методов разработки грунтов в промышленности, способов воздействия на обрабатываемую среду в сельском хозяйстве, средств добычи древесины в лесной промышленности к гусеничным машинам предъявляются все более высокие требования. В связи с увеличением удельной мощности машин, ростом тяговых усилий увеличивается степень воздействия на опорную поверхность, что противоречит требованиям экологичности и технологиям возделывания почвы. Таким образом, перед разработчиками гусеничных машин встают задачи оптимизации параметров техники с целью увеличения производительности, с одной стороны, и обеспечения минимального воздействия на обрабатываемую среду или опорную поверхность, с другой. Эти требования являются взаимоисключающими. С одной стороны, увеличение мощности машин ведет к увеличению массы машины, с другой стороны, увеличение массы машины является нежелательным в связи с увеличением воздействия на опорную поверхность.

Методикам определения параметров гусеничного движителя посвящено достаточно много работ. Имеются практические рекомендации по определению основных геометрических зависимостей [1], позволяющие выбрать тип подвески, определить основные геометрические параметры траков, ведущего и направляющего колес. Проанализированы конструкции подвесок гусеничных машин с точки зрения проходимости [2], приведены оценочные параметры гусеничной цепи с металлическими и резинометаллическими шарнирами, предложены основные методики их расчетов. Изложены методики расчета полужестких, упругих и балансирных подвесок с применением торсионов и амортизаторов [3]. Издания последних лет посвящены анализу внутренних динамических процессов гусеничного движителя, рассматривая гусеничную цепь, как абсолютно гибкую нить [4]. Однако имеющиеся методы расчетов не позволяют определять с достаточной точностью степень влияния параметров двигателя, трансмиссии, движителя, рабочего оборудования на характеристики машин, требующие оптимизации.

Решение таких задач в настоящее время возможно с использованием информационных технологий. На рынке программного обеспечения имеется ряд систем автоматизированного проектирования, в том числе основанных на использовании метода конечных элементов, которые позволяют решать задачи, связанные с расчетом напряжений и деформаций в металлоконструкциях машин. Однако в данном случае существенным затруднением является определение нагрузок, возникающих при работе машины. Применяемые в настоящее время методики позволяют производить расчет усилий, возникающих в различных элементах машины с использованием коэффициентов динамичности, полученных на основе экспериментальных исследова-

ний, статистическими способами обработки информации. Такой подход может привести к необоснованному увеличению массы машины из-за усреднения величин нагрузок, воздействующих на движитель, применения статистических данных, используемых при определении коэффициента динамичности. Развитие имитационного моделирования, предполагающего разработку математических моделей и последующую их реализацию с помощью систем программирования или интерпретирования, позволяет получить виртуальные имитационные модели, дающие хорошие результаты при их практическом применении [5], [6].

Выделим основные элементы гусеничной машины, включаемые в имитационную модель: ДВИГАТЕЛЬ – ТРАНСМИССИЯ – ГУСЕНИЧНЫЙ ДВИЖИТЕЛЬ – ОПОРНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ – РАБОЧЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ – РАЗРАБАТЫВАЕМАЯ СРЕДА – ОПЕРАТОР. Одной из наиболее сложных систем в данной модели является гусеничный движитель, так как он содержит большое количество разнотипных элементов, которые в любой момент времени изменяют свое взаимное расположение. В настоящее время определение параметров гусеничного движителя производится на основании статических и регрессионных зависимостей, а учет взаимодействия элементов движителя при работе – с помощью коэффициентов динамичности.

### Математическая модель

Более точному определению динамических параметров может помочь специализированное программное обеспечение, разработанное на основании математической модели гусеничного движителя [7], [8], динамическая модель которого представлена на рис. 1.

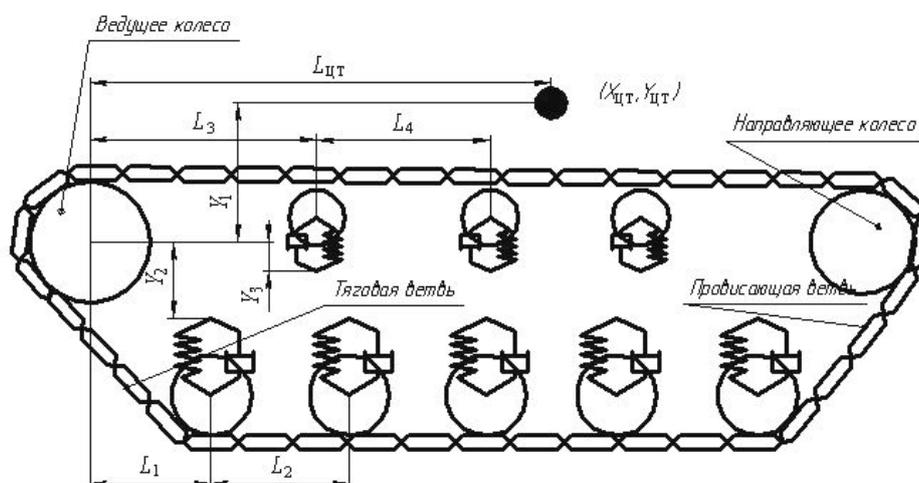


Рис. 1. Общая динамическая модель гусеничного движителя:  $L_{цт}$  – расстояние от центра тяжести до центра ведущего колеса;  $L_1$  – расстояние от центра ведущего колеса до центра опорного колеса;  $L_2$  – расстояние между центрами опорных колес;  $L_3$  – расстояние от центра ведущего колеса до центра поддерживающего колеса;  $Y_1$  – расстояние от центра тяжести до центра ведущего колеса;  $Y_2$  – расстояние от центра ведущего колеса до точки крепления опорной подвески;  $Y_3$  – расстояние от центра тяжести до точки крепления верхней подвески

При составлении математической модели приняты следующие допущения: рассматривается плоская модель; диссипативные силы пропорциональны относительным скоростям элементов; опорная поверхность горизонтальна и не деформируема; начальные условия определяются на основе статических зависимостей; угол стабилизации машины не превышает  $20^\circ$ ; система координат соответствует декартовой;

нулевое направление отсчета углов с запада на восток; положительное направление отсчета углов – против часовой стрелки; рассматривается машина с приводом на заднее колесо.

Определим места положения траков в движителе: под опорным колесом, между опорными колесами, на верхней ветви, на поддерживающем колесе, на провисающей ветви (рис. 1), на направляющем колесе, на ведущем колесе, на тяговой части ветви.

В соответствии с описанными случаями составлены уравнения равновесия для траков в каждом отдельном случае.

На трак, расположенный между опорными колесами, который представлен на рис. 2, действуют силы тяжести ( $mg$ ), реакции микропрофиля дороги ( $R_q$ ), горизонтальная составляющая силы взаимодействия с последующим траком ( $F_X^{i+1}$ ), горизонтальная составляющая силы взаимодействия с предыдущим траком ( $F_X^{i-1}$ ), вертикальная составляющая силы взаимодействия с последующим траком ( $F_Y^{i+1}$ ), вертикальная составляющая силы взаимодействия с предыдущим траком ( $F_Y^{i-1}$ ). Составим уравнения равновесия от рассмотренных сил. Количество степеней свободы для трака в данном случае равно трем, необходимо составить три уравнения.

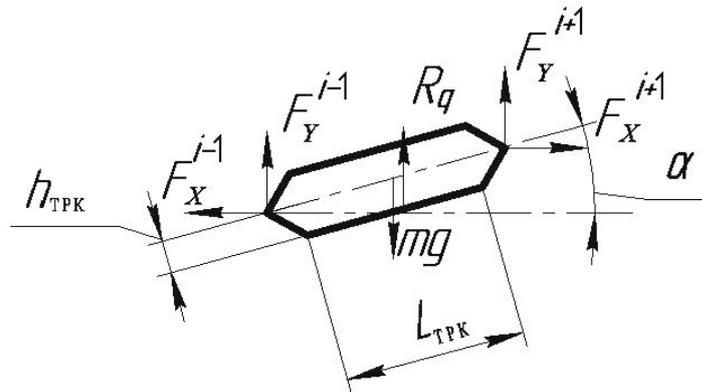


Рис. 2. Динамическая модель трака, расположенного между опорными колесами

$$\frac{\partial \dot{X}_{\text{ТПК}}}{\partial t} = (F_X^{i+1} - F_X^{i-1}) / m_{\text{ТПК}};$$

$$\frac{\partial Y_{\text{ТПК}}}{\partial t} = (F_Y^{i+1} + F_Y^{i-1} - m_{\text{ТПК}}g + R_q) / m_{\text{ТПК}};$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{\varphi}_{\text{ТПК}}}{\partial t} = & (F_Y^{i+1} \cdot \sin(\alpha) \cdot L_{\text{ТПК}} / 2 - F_Y^{i-1} \cdot \sin(\alpha) \cdot L_{\text{ТПК}} / 2 - F_X^{i+1} \cdot \cos(\alpha) \cdot h_{\text{ТПК}} / 2 + \\ & + F_X^{i-1} \cdot \sin(\alpha) \cdot h_{\text{ТПК}} / 2) / J_{\text{ТПК}}, \end{aligned}$$

где  $m_{\text{ТПК}}$  – масса трака;  $g$  – ускорение свободного падения;  $J_{\text{ТПК}}$  – момент инерции трака;  $\alpha$  – текущий угол наклона трака к направлению отсчета углов, здесь силы  $F_X$  и  $F_Y$

$$F_X = C_{\text{ТПК}}(X_{\text{Н}}^{i+1} - X_{\text{К}}^i) - r \cdot \dot{X},$$

$$F_Y = C_{\text{ТРК}}(Y_H^{i+1} - Y_K^i) - r \cdot \dot{Y},$$

где  $C_{\text{ТРК}}$  – приведенный коэффициент жесткости шарниров соседних трактов.

Величины  $X_H^{i+1}$ ,  $X_K^{i-1}$ ,  $Y_H^{i+1}$ ,  $Y_K^{i-1}$  определяются в соответствии с рис. 3.

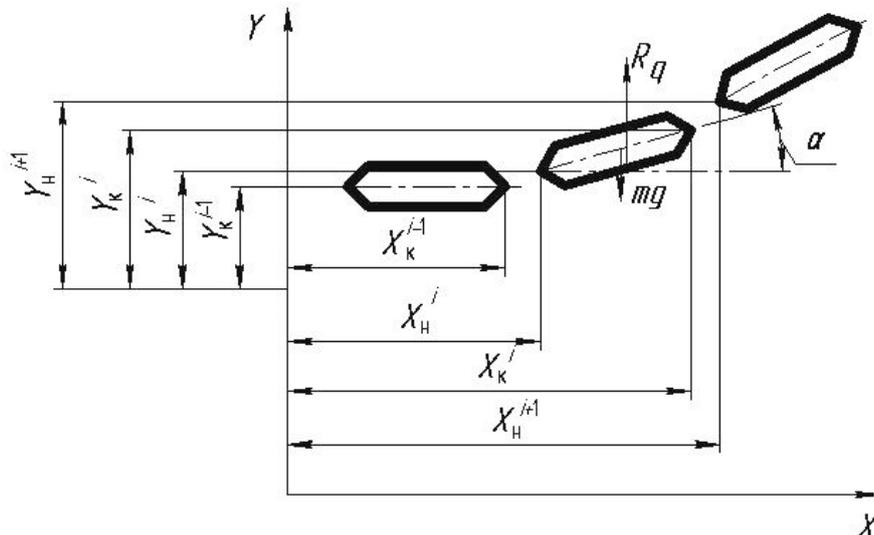


Рис. 3. Схема для определения расстояний между центрами шарниров соседних трактов по горизонтальной и вертикальной осям:  $X_H^{i+1}$  – абсцисса левого шарнира последующего трака по оси  $X$  для трактов, расположенных на опорной ветви;  $X_K^{i-1}$  – абсцисса правого шарнира предыдущего трака по оси  $X$  для трактов, расположенных на опорной ветви;  $Y_H^{i+1}$  – ордината левого шарнира последующего трака по оси  $Y$  для трактов, расположенных на опорной ветви;  $Y_K^{i-1}$  – ордината правого шарнира предыдущего трака по оси  $Y$  для трактов, расположенных на опорной ветви;  $r$  – коэффициент диссипативных сил;  $\dot{X}$ ,  $\dot{Y}$  – соответственно скорости трактов по оси  $X$  и  $Y$

Для трака рис. 4, расположенного под опорным колесом, уравнения равновесия составим аналогично:

$$\frac{\partial \dot{X}_{\text{ТРК}}}{\partial t} = (F_X^{i+1} - F_X^{i-1}) / m_{\text{ТРК}};$$

$$\frac{\partial \dot{Y}_{\text{ТРК}}}{\partial t} = (F_Y^{i+1} + F_Y^{i-1} - m_{\text{ТРК}}g + R_q - R_K \cdot \cos(\alpha)) / m_{\text{ТРК}};$$

$$\frac{\partial \dot{\Phi}_{\text{ТРК}}}{\partial t} = (F_Y^{i+1} \cdot \sin(\alpha) \cdot L_{\text{ТРК}} / 2 - F_Y^{i-1} \cdot \sin(\alpha) \cdot L_{\text{ТРК}} / 2 - F_X^{i+1} \cdot \cos(\alpha) \cdot h_{\text{ТРК}} / 2 + F_X^{i-1} \cdot \sin(\alpha) \cdot h_{\text{ТРК}} / 2 - R_K \cdot \Delta L) / J_{\text{ТРК}},$$

где  $R_K$  – усилие от взаимодействия между трактом и колесом;  $\Delta L$  – текущее расстояние от центра трака до точки взаимодействия между трактом и колесом.

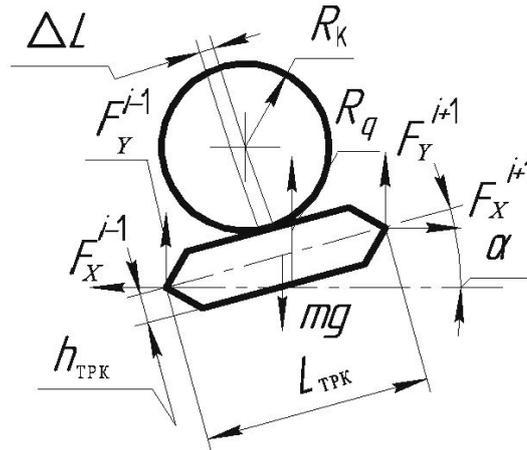


Рис. 4. Динамическая модель трака, расположенного под опорным колесом

Принимая допущения, что движитель взаимодействует с опорной поверхностью, которая является несминаемой, силу  $R_q$  можно определить на основании теории упругости:

$$R_q = C_{\text{ТП}} \cdot \Delta Y,$$

где  $C_{\text{ТП}}$  – приведенный коэффициент жесткости трака и опорной поверхности (в случае, когда жесткость опорной поверхности недостаточна, можно принять только коэффициент жесткости опорной поверхности);  $\Delta Y$  – величина взаимной деформации трака и опорной поверхности.

В некоторых случаях трак может отрываться от опорной поверхности. Для определения возникновения данного случая, на каждом шаге расчета необходимо проверять расстояние от центра трака до опорной поверхности, в случае, когда это расстояние превышает  $h_{\text{ТПК}}/2$ , тогда  $R_q$  равно нулю.

Учитывая, что опорное колесо на некоторых режимах движения может выходить из соприкосновения с траком, необходимо разработать алгоритм определения истинного взаимного положения трака и колеса.

Схема для составления модели трака, расположенного на провисающей ветви гусеничного обвода (рис. 1), представлена на рис. 5.

Математическая модель для данного случая имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \dot{X}_{\text{ТПК}}}{\partial t} = (F_X^{i+1} - F_X^{i-1}) / m_{\text{ТПК}};$$

$$\frac{\partial \dot{Y}_{\text{ТПК}}}{\partial t} = (F_Y^{i+1} + F_Y^{i-1} - m_{\text{ТПК}}g) / m_{\text{ТПК}};$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{\varphi}_{\text{ТПК}}}{\partial t} = & (F_Y^{i+1} \cdot \sin(\alpha) \cdot L_{\text{ТПК}}/2 - F_Y^{i-1} \cdot \sin(\alpha) \cdot L_{\text{ТПК}}/2 - \\ & - F_X^{i+1} \cdot \cos(\alpha) \cdot h_{\text{ТПК}}/2 + F_X^{i-1} \cdot \sin(\alpha) \cdot h_{\text{ТПК}}/2) / J_{\text{ТПК}}. \end{aligned}$$

Для траков, расположенных на верхней ветви, на поддерживающем колесе, на ведущем колесе, на тяговой ветви (рис. 1) уравнения составляются аналогичным образом.

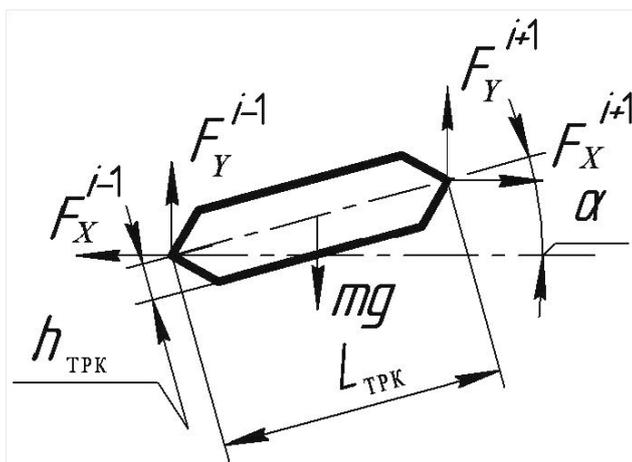


Рис. 5. Динамическая модель трака, расположенного на провисающей ветви гусеничного обвода

Одним из основных затруднений при решении математической модели является необходимость использования переменной структуры дифференциальных уравнений из-за невозможности описания взаимодействия траков с элементами движителя одной системой уравнений в связи с тем, что каждый трак в разные моменты времени может контактировать с различными частями движителя.

#### Метод кодировки траков

Для решения данной системы уравнений применяется численное интегрирование методом Эйлера. Могут применяться и другие методы, такие, как метод Рунге-Кутты второго либо четвертого порядка, метод Гира. Кроме того, требуется разработка специального алгоритма, с помощью которого определяются усилия воздействия на каждый трак в зависимости от его месторасположения в текущий момент времени. Основой для составления данного алгоритма является кодировка траков в зависимости от их расположения в движителе в каждый момент времени.

Значение кода подчиняется следующей классификации расположения траков: «ds» – на опорной ветви между колесами; «dv» – под опорным колесом; «rs» – на правой наклонной ветви; «rv» – на направляющем колесе; «us» – на верхней ветви; «uv» – над верхним колесом; «lv» – на ведущем колесе; «ls» – на левой наклонной ветви. Буквенные значения кодов выбраны условно и не несут принципиальной смысловой направленности.

Основываясь на априорной информации о том, что гусеничные машины работают на поверхностях, угол наклона которых незначительно отличается от горизонтального направления (для бульдозеров не более  $20^\circ$ ), будем использовать для кодировки траков проекции центров колес на оси абсцисс для горизонтальной и наклонной ветвей гусеничного обвода.

При расчете начальных условий определяются: высота расположения центра тяжести машины, угол стабилизации машины в зависимости от расположения центра тяжести по направлению вдоль оси абсцисс. Далее проводится построение гусеничного обвода и нумерация траков. При проведении нумерации на начальном этапе отсчет ведется от трака, расположенного под первым опорным колесом в положительном направлении оси абсцисс и далее против часовой стрелки. Номера траков сохраняются в исходных данных на весь сеанс расчета. Кодировка трака производится исходя из того, что первый трак расположен под первым опорным колесом машины, входит в соприкосновение с этим колесом и имеет код «dv». В дальнейшем код трака определяется в соответствии с рис. 6 на основании следующих зависимостей:

$$b = \sqrt{(X_C - X_H)^2 + (Y_C - Y_H)^2},$$

$$a = \sqrt{(X_C - X_K)^2 + (Y_C - Y_K)^2},$$

$$p = (a + b + l) / 2,$$

где  $l$  – длина трака;  $p$  – полупериметр.

При условии

$$\begin{cases} (p \cdot (p - a) \cdot (p - b) \cdot (p - l)) > 0, \\ b \leq 2 \cdot (r + l), \\ a \leq 2 \cdot (r + l) \end{cases} \rightarrow h_L = \frac{2}{l} \sqrt{(p \cdot (p - a) \cdot (p - b) \cdot (p - l))},$$

иначе  $h_L = 0$ .

Дальнейшее определение кода трака производится с использованием алгоритма, изложенного ниже, предназначенного для определения случая соприкосновения трака и колеса.

На начальном этапе в переменные, содержащие данные о траке, вводится логическая переменная, имеющая значение false (ложь).

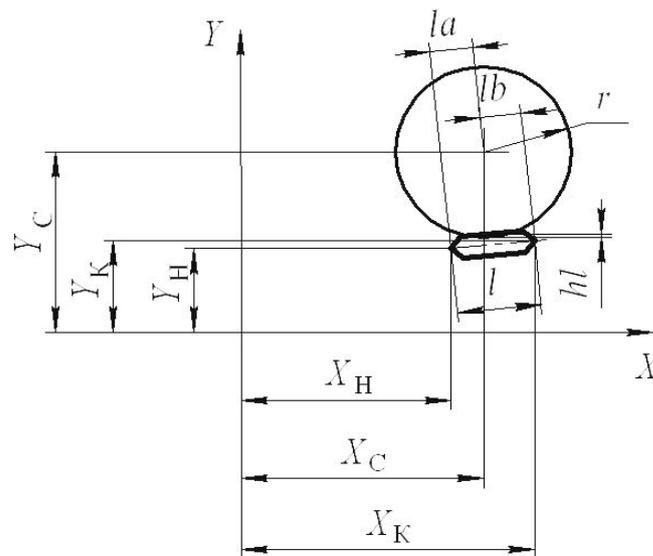


Рис. 6. Геометрическая схема для определения кода траков

Определяем размеры  $la$  и  $lb$ .

$$la = \sqrt{b^2 - h_L^2},$$

$$lb = \sqrt{a^2 - h_L^2}.$$

При любом из условий  $a > r$ ,  $b > r$ ,  $la > l$ ,  $lb > l$  логическая переменная принимает значение истина (true), а  $dl = r - h_L$ , где  $dl$  – величина, определяющая «перекрывание» трака и колеса. С помощью величины  $dl$  в дальнейшем определяется усилие от взаимодействия трака с соответствующим колесом на основании теории упругости.

После присвоения соответствующего значения логической переменной можно определить значение кода трака в зависимости от его месторасположения в гусенич-

ном обводе. Для этого в каждый момент времени необходимо определять, с каким именно колесом может войти в соприкосновение трак. В зависимости от текущего положения трака можно сделать вывод о том, с какими элементами движителя он может взаимодействовать. Ограничение вариантов выбора приводит к сокращению времени расчета. В результате предлагается использовать специальный алгоритм. Суть этого алгоритма в следующем:

- если трак имеет код «ds» или «dv», он может войти в соприкосновение только с опорными колесами и необходимо выбрать именно то колесо, с которым может войти в соприкосновение трак. В этом случае предлагается проводить сравнение величин проекций центра трака и центра опорного колеса на ось абсцисс. Как только величина проекции центра трака на ось абсцисс станет больше проекции центра  $j$ -го колеса, на следующем шаге расчета необходимо проводить сравнение для этого трака с проекцией центра  $j+1$  колеса для опорной ветви и  $j-1$  колеса для поддерживающей ветви. Это связано с тем, что перебор траков осуществляется в направлении возрастания их номеров;

- в случае, когда значение проекции центра трака на ось абсцисс больше значения проекции центра последнего колеса на ту же ось, траку присваивается код «rs»;

- если трак имеет код «rs», тогда сравнение необходимо проводить с направляющим колесом. В этом случае метод присвоения кода трака используется только при условии, когда проекция центра трака на ось абсцисс больше проекции центра направляющего колеса на ту же ось. При условии соприкосновения трака с направляющим колесом траку присваивается код «tv». В остальных случаях траку присваивается код «rs»;

- трак имеет код «tv»: в этом случае на каждом шаге расчета необходимо определять условие соприкосновения трака и колеса. В том случае, если трак не входит в соприкосновение с колесом и выполняется условие:

$$X_{\text{ТРК}} < X_{\text{Н}}^C \text{ и } Y_{\text{ТРК}} > Y_{\text{Н}}^C,$$

где  $X_{\text{ТРК}}$ ,  $Y_{\text{ТРК}}$  – проекции центра трака на оси абсцисс и ординат соответственно;  $X_{\text{Н}}^C$ ,  $Y_{\text{Н}}^C$  – проекции центра направляющего колеса на оси абсцисс и ординат соответственно – траку присваивается код «us», т. е. трак расположен на верхней ветви гусеничного обвода и на следующем шаге расчета необходимо проводить сравнение с последним поддерживающим колесом;

- в случае нахождения трака в «зоне» поддерживающего колеса, т. е. проекция центра трака на ось абсцисс больше проекции  $X_{\text{C}} + r$  поддерживающего колеса на ось абсцисс и меньше проекции  $X_{\text{C}} - r$  на ось абсцисс, необходимо производить анализ наступления случая соприкосновения трака с колесом. Если этот анализ дает результат «истина», тогда траку присваивается код «uv», в данном случае  $X_{\text{C}}$  – ордината центра поддерживающего колеса,  $r$  – радиус поддерживающего колеса;

- в случае, когда трак имеет код «us» и проекция его центра на ось абсцисс меньше проекции центра первого поддерживающего колеса на ту же ось необходимо произвести анализ на предмет взаимодействия с ведущим колесом. В том случае, если этот анализ дает результат «истина» – траку присваивается код «lv»;

- если трак имеет код «lv», на следующем шаге проводится сравнение проекции центра трака на ось ординат, и если это значение меньше проекции центра колеса на ту же ось, а анализ соприкосновения трака и колеса дает результат «ложь», тогда траку присваивается код «ls».

Процесс кодировки траков осуществляется с использованием циклического алгоритма, начиная от трака с номером «1» в направлении возрастания номеров траков.

Одним из основных недостатков данной методики является необходимость использования проекций траков на оси координат, что может привести к неточным результатам, «зависанию» расчета при больших углах стабилизации машины.

При имитации движения траки перемещаются относительно центра масс машины. Таким образом, первый трак может занимать любое место в пределах гусеничного обвода. В связи с этим производится анализ номеров траков для определения последнего, и при наступлении данного случая производится переход на первый трак.

Проводя наблюдения за работой гусеничного движителя на реальном объекте либо на физической модели, можно визуально, с достаточной точностью, определить, в каком месте гусеничного обвода находится каждый трак. Для машин, работающих с большими скоростями, необходимо проводить видеосъемку для дальнейшего анализа. Учитывая, что имитационная модель должна быть максимально приближена к исследуемому объекту, в программном обеспечении также предусматривается возможность визуального анализа, с помощью вывода на экран в графической форме значений кодов траков в каждый момент времени (рис. 7). На данном рисунке кодировка траков выполнена для каждого нечетного трака с целью исключения наложения изображений кодов и удобства анализа.

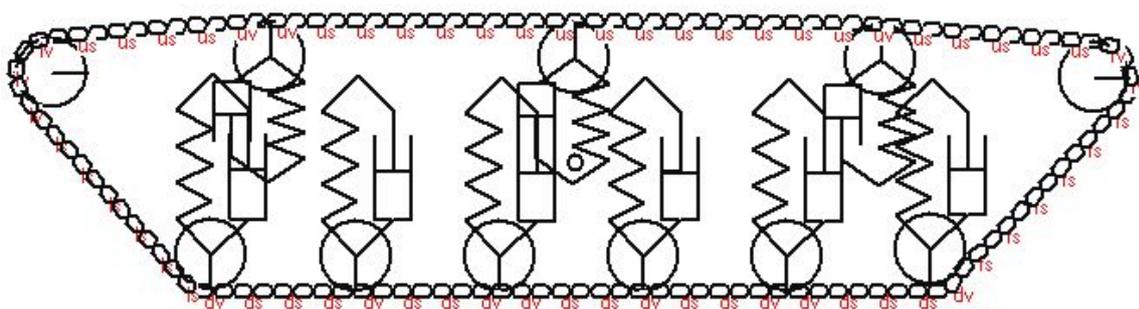


Рис. 7. Фрагмент работы программного обеспечения с визуализацией гусеничного движителя с кодировкой траков

Моменты входа в соприкосновения траков и колес могут быть представлены в графической и численной форме по желанию пользователя. Следует отметить, что адекватность расчетных усилий взаимодействия траков реальным зависит в значительной степени от адекватности исходных данных, т. е. так же как и при работе с программным обеспечением, основанным на использовании метода конечных элементов, таких как «Cosmos», «SIMULINC», «ADAMS».

Тестирование программного обеспечения, разработанного с использованием предлагаемой методики на компьютере с процессором «Celeron 2000» показало, что на проведение 10-секундного расчета движения машины требуется около пяти минут. Это достигается за счет сокращения вариантов перебора траков, находящихся в соприкосновении с соседними элементами, и значительного сокращения количества решаемых последовательно уравнений, и превышает скорость расчетов с применением программных продуктов, основанных на использовании метода конечных элементов [9].

В настоящее время адекватность расчетов определялась на основании сравнения силы тяги по сцеплению, полученной по общепринятой зависимости

$$F_T = \varphi_{\text{сц}} \cdot G_{\text{сц}},$$

где  $\varphi_{\text{сц}}$  – коэффициент сцепления;  $G_{\text{сц}}$  – сцепной вес машины и силы тяги по сцеплению, полученной по предлагаемой зависимости

$$F_T = \varphi_{\text{сц}} \sum R_q.$$

Погрешность расчетов составляет 15–25 %, что находится в пределах погрешности эксперимента и позволяет сделать вывод о перспективности применения предлагаемых методик и необходимости дальнейших исследований.

Основным отличием предлагаемой методики является моделирование каждого трака, как твердого тела, в отличие от методов моделирования гусеничного обвода, как абсолютно гибкой нити, например [4, с. 71], что позволит уточнить в дальнейшем усилия взаимодействия траков, опорных, ведущего, направляющего и поддерживающего колес при анализе работы машины на различных режимах. Данная методика предназначена для разработки имитационной модели гусеничного движителя в виде программного обеспечения с визуализацией движения машины на экране, что позволит выявить визуально случаи движения, требующие детальных исследований, а также позволит проводить анализ поведения машины специалистам, не обладающим высокой квалификацией в данной области.

### **Заключение**

В статье предложена методика создания имитационной модели гусеничного движителя на основании моделирования каждого трака, как твердого тела, что отличается от способов моделирования гусеничного обвода, как абсолютно гибкой нити. Данный подход позволит уточнить в дальнейшем усилия взаимодействия траков, опорных, ведущего, направляющего и поддерживающего колес при анализе работы машины в различных режимах. Представлена общая структура имитационной модели гусеничной машины, учитывающая наиболее важные системы, оказывающие существенное влияние на основные параметры машины. Разработаны математические модели взаимодействия траков между собой и с опорными, поддерживающими, ведущим и ведомым колесами. Выявлена необходимость разработки специальных алгоритмов кодировки траков, и данные алгоритмы представлены. Разработано программное обеспечение, тестирование которого показало достаточную точность и высокую скорость расчетов. Полученные результаты могут найти применение при расчете нагрузок, возникающих при работе гусеничной машины в ее элементах, для последующей оптимизации параметров элементов и проведения прочностных расчетов с использованием метода конечных элементов.

### **Литература**

1. Барский, И. Б. Конструирование и расчет тракторов : учеб. пособие / И. Б. Барский. – Москва : Машиностроение, 1968. – 376 с.
2. Расчет и конструирование гусеничных машин : учебник / под ред. Н. А. Носова. – Ленинград : Машиностроение, 1972. – 560 с.
3. Тракторы. В 3 ч. Ч. III. Конструирование и расчет : учеб. пособие для вузов / под общ. ред. В. В. Гускова. – Минск : Выш. шк., 1981. – 383 с.
4. Пастух, С. Н. Динамика машин : учеб. пособие / С. Н. Пастух, Р. А. Кустаров. – Москва : Воен.-инженер. акад., 2005. – 189 с.

5. Тарсик, В. П. Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарсик. – Минск : Дизайн-ПРО, 1997. – 640 с. : ил.
6. Коробкин, В. А. Математическое моделирование переходных процессов в трансмиссии гусеничной машины / В. А. Коробкин, С. В. Кузнецов // Вестн. Могилев. гос. техн. ун-та. – 2003. – № 2. – С. 67–73.
7. Лесковец, И. В. Математическая модель гусеничного движителя СДМ / И. В. Лесковец // Вестн. Могилев. гос. техн. ун-та. – 2003. – № 2. – С. 83–87.
8. Лесковец, И. В. Математическая модель гусеничного движителя / И. В. Лесковец // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 1. – С. 15–23.
9. Колесов, Ю. Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем / Ю. Б. Колесов. – Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петерб. гос. политехн. ун-та, 2004. – 239 с.

*Получено 08.12.2006 г.*