

обеспечивают в полной мере реализацию их параметрического анализа и синтеза. В этой связи возникает комплекс актуальных и важных задач, связанных с разработкой методов, алгоритмов и программного обеспечения для организации многовариантных исследований динамических процессов в исследуемых конструкциях. В данной работе описаны подходы, методы, структура систем комплексного моделирования и численные модели для исследования реакции транспортного средства на динамическое воздействие от неровностей трассы и импульсное воздействие от усилий отдачи при выстреле на примере бронетранспортера БТР-80.

ОБЩАЯ СХЕМА ИССЛЕДОВАНИЙ. Учитывая сложность поставленных задач и сложность исследуемых конструкций, было принято решение использовать предложенный ранее обобщенный параметрический подход, применение которого дает возможность создавать гибкую специализированную САПР и параметрические модели, позволяющие описать довольно широкий класс колесных и гусеничных машин [2].

Данная технология предусматривает комплексный подход к решению проблемы проектирования и модернизации, поскольку позволяет промоделировать изменения любых числовых параметров, используемых для описания модели, и всесторонне проанализировать влияние этих изменений в различных специализированных инженерных пакетах.

Естественным образом при исследовании предложенного подхода возникают следующие задачи:

§ разработка математической модели исследуемых процессов в динамической системе;

§ разработка структуры специализированного и программно-модельного комплекса, реализующего предложенную технологию исследований;

§ проведение тестовых исследований.

Ниже описаны этапы исследований в указанной последовательности.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИССЛЕДУЕМЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

1. Формирование уравнений движения системы тел. Рассмотрим методы формирования уравнений движения систем абсолютно твердых и деформируемых тел. В настоящее время существует большое количество методов для решения подобных задач [3], но ниже ограничимся лишь методами, связанными с численным моделированием. В частности, большее внимание уделяется построению уравнений движения системы. Методы построения уравнений движения механических систем хорошо известны начиная со времен Даламбера и Лагранжа. Однако представляет особый интерес численные методы, ориентированные на современную вычислительную технику. Изложение следует подходу, предложенному в [3, 4].

2. Уравнения Лагранжа 2-го рода. Уравнения движения получаются из уравнения Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q}, \quad (1)$$

где $T(q, \dot{q}, t)$ – кинетическая энергия системы;

q – столбец обобщенных координат системы (размером n);

$\Pi(q, t)$ – потенциальная энергия системы.

Уравнения движения после вычисления производных имеют вид:

$$M(q, t) \ddot{q} = Q(q, \dot{q}, t), \quad (2)$$

где M – матрица масс системы размером $n \times n$;

Q – вектор обобщенных сил.

Приведенный способ получения уравнений движения довольно прост, но для реальных технических систем, состоящих из многих тел, составление уравнений вручную является достаточно громоздкой задачей. Поэтому для решения таких задач создаются автоматизированные программные комплексы для автоматического составления и решения уравнений движения [3].

3. Общий подход к построению уравнения движения деформируемого тела. Рассмотрим, следуя [3, 4], произвольное деформируемое тело, изображенное на рис.1. Все проведенные выкладки справедливы как для произвольного деформируемого, так и абсолютно твердого тела. В общем случае на тело действуют распределенные силы $f(M)$ и моменты $m(M)$ в каждой точке M , изображенные на рис.1 вектором $\mathbf{F}(M) = \{f^T, m^T\}^T$, и сосредоточенные силы и моменты реакции \mathbf{R}_k , также представляющие собой шести-компонентные векторы.

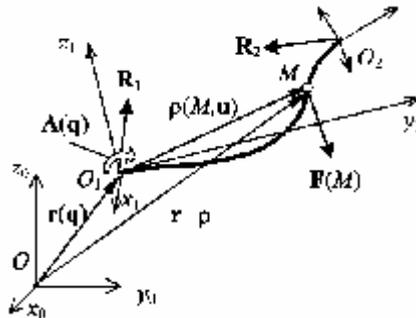


Рис.1. Деформируемое тело

Следуя формализму подвижной системы координат [5, 6], для обеспечения возможности произвольного пространственного движения тела относи-

тельно фиксированной системы координат x_0, y_0, z_0 (СК0) необходимо ввести систему координат x_1, y_1, z_1 (СК1) с началом в точке O_1 . Положение и ориентация подвижной системы координат СК1 задается соответственно радиус-вектором $r(q)$ и матрицей поворота $A(q)$, которые зависят от элементов столбца обобщенных координат q .

Если тело свободно в пространстве, то чаще всего столбец q содержит шесть координат – три координаты начала отсчета O_1 и одну из возможных троек углов поворота [7, 8] (Эйлера, Кардано и т.п.). Во избежание вырождения углов ориентации можно использовать четыре параметра Эйлера.

Вектор скорости $\dot{\mathbf{r}}$ начала отсчета O_1 , а также вектор ω угловой скорости подвижной системы координат определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{r}} &= D\dot{q} + r'_i; \\ \omega &= B\dot{q} + \omega'_i,\end{aligned}\tag{3}$$

где матрицы $D(q)$ и $B(q)$ составлены из столбцов d_i и b_i :

$$\begin{aligned}D &= \frac{\partial r}{\partial q^T} = [d_1 d_2 \dots d_n], \quad \text{где } d_i = \frac{\partial r}{\partial q_i}; \quad r'_i = \frac{\partial r}{\partial t}; \\ B &= \frac{\partial \omega}{\partial \dot{q}} = [b_1 b_2 \dots b_n], \quad \text{где } \tilde{b}_i = \frac{\partial A}{\partial q_i} A^T; \quad \omega'_i = \frac{\partial A}{\partial t} A^T.\end{aligned}\tag{4}$$

Деформированное состояние тела определяется зависимостью радиус-вектора $\rho(M, u)$ произвольной точки M тела от вектора локальных обобщенных координат u , которые выражают меру деформации тела. Обычно их выбирают так, что при $u = 0$ тело недеформировано. Зависимость $\rho(u)$ в линейном случае имеет вид: $\rho = Su$. Вектор ρ представлен в проекциях на оси подвижной СК1, а в проекциях на оси неподвижной СК0:

$$\rho = \rho(q, M, u) = A(q)\rho(M, u).\tag{5}$$

Производная вектора ρ по времени имеет вид:

$$\dot{\rho} = A\dot{\rho} + A\dot{\rho} = \dot{A}^T A\rho + A\dot{\rho} = \tilde{\omega}\rho + v_u.\tag{6}$$

Относительная скорость v_u произвольной точки тела и относительная угловая скорость ω_u системы координат, связанной с данной точкой, равны:

$$\begin{aligned}v_u &= A\dot{\rho} = AD\dot{u} = D_u\dot{u}; \\ \omega_u &= ABu = B_u\dot{u}.\end{aligned}\tag{7}$$

Таким образом, состояние деформируемого тела полностью описывается набором обобщенных координат $x = \{q^T \quad u^T\}^T$. Уравнения движения тела запишутся так:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial \Pi}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial x}, \quad (8)$$

где $T(x, \dot{x}, t)$ – кинетическая энергия тела;

$\Pi(u, t)$ – потенциальная энергия внутренних сил упругих деформаций;

$\delta W = \delta W' + \delta W''$ – виртуальная работа $\delta W'$ активных внешних сил и реакций $\delta W''$, вызванных произвольной вариацией координат δx .

Кинетическая энергия – это интеграл по объему тела:

$$T = \frac{1}{2} \int_V \mu v^T v dV,$$

где μ – плотность тела;

$v = \dot{x} + \tilde{\omega} \rho + v_u$ – абсолютная скорость точек тела.

Выражение для производных от кинетической энергии:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial T}{\partial x} = \int_V \mu \left(\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial v^T}{\partial \dot{x}} \right] v + \frac{\partial v^T}{\partial \dot{x}} \tilde{\omega} - \frac{\partial v^T}{\partial x} v \right) dV = \int_V \mu \frac{\partial v^T}{\partial \dot{x}} \tilde{\omega} dV. \quad (9)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial v^T}{\partial \dot{x}} &= D^T + B^T \tilde{\rho}, \quad \frac{\partial v^T}{\partial \dot{\omega}} = D_u^T, \\ \tilde{\omega} &= \tilde{\omega} + \tilde{\epsilon} \rho + \tilde{\omega} \tilde{\omega} + 2\tilde{\omega} \tilde{\rho} + \tilde{\rho} \tilde{\rho}. \end{aligned} \quad (10)$$

В уравнении (8)

$$\frac{\partial \Pi}{\partial q} = 0,$$

так как потенциальная энергия деформации зависит лишь от локальных координат. Производная потенциальной энергии по u дает обобщенную силу

$$\frac{\partial \Pi}{\partial u} = -F_u^{elast}(u).$$

Виртуальная работа внешних сил $\delta W'$ складывается из работ распределенных сил $f(M)$ и моментов $m(M)$ на возможных перемещениях точек тела. Введем столбец линейных и угловых скоростей:

$$\xi = \left\{ \begin{array}{c} \tilde{\omega} - \tilde{\rho} \omega + v_u \\ \omega + \omega_u \end{array} \right\}. \quad (11)$$

Первая его составляющая выражает собой теорему о сложении скоростей, вторая – угловых скоростей. Переходя по аналогии к вариациям и учитывая зависимости (3), (7), получаем выражение для возможных линейных и угловых перемещений через вариации обобщенных координат:

$$\delta\xi = \begin{Bmatrix} \partial r - \tilde{\rho}\delta\omega + \partial v_u \\ \partial\omega + \partial\omega_u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} D\delta q - \tilde{\rho}B\delta q + D_u\partial u \\ B\delta q + B_u\partial u \end{Bmatrix} = C\Phi\delta q + S\delta u, \quad (12)$$

где введены матрицы

$$C = \begin{bmatrix} I & -\tilde{\rho} \\ O & I \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} D \\ B \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} D_u \\ B_u \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Тогда

$$\delta W' = \int_V \delta\xi^T F dV = \int_V (\partial q^T \Phi^T C^T F + \partial u^T S^T F) dV; \quad (14)$$

$$Q'_q = \frac{\delta W'}{\delta q} = \Phi^T \left(\int_V C^T F dV \right) = \Phi^T F_q; \quad (15)$$

$$Q'_u = \frac{\delta W'}{\delta u} = \int_V S^T F dV;$$

$$Q''_q = \Phi^T \left(\sum_k C_{M_k}^T R_k \right) = \Phi^T R_q; \quad (16)$$

$$Q''_u = \left(\sum_k S_{M_k}^T R_k \right) = R_u.$$

При подстановке (9) – (16) уравнения (8) принимают вид:

$$\Phi^T \left(\begin{Bmatrix} m\tilde{\rho} - m\tilde{\rho}_c \tilde{\rho} + \int_V \mu \tilde{\rho} dV + \tilde{\omega} \tilde{\omega} m \rho_c + 2 \int_V \mu \tilde{\omega} \tilde{\rho} dV \\ m\tilde{\rho}_c \tilde{\rho} - J_c \tilde{\rho} + \int_V \mu \tilde{\rho} dV + \tilde{\omega} J_c \omega + 2 \int_V \mu \tilde{\rho} \tilde{\omega} dV \end{Bmatrix} - F_q - R_q \right) = 0; \quad (17)$$

$$\int_V D^T (\mu \tilde{\rho} - \mu \tilde{\rho} \tilde{\rho} + \mu \tilde{\rho} + \mu \tilde{\omega} \tilde{\omega} \rho + 2\mu \tilde{\omega} \tilde{\rho}) dV - Q'_u - F_u^{elast} - R_u = 0,$$

где $m = \int_V \mu dV$ – масса тела;

$m\rho_c = \int_V \mu \rho dV$ – радиус-вектор центра масс тела относительно точки O_1 ,

умноженный на массу;

$$J_C = -\int_V \mu \tilde{\rho} \tilde{\rho} dV - \text{тензор инерции тела относительно точки } O_1.$$

Выразим \mathfrak{B} следующим образом:

$$\mathfrak{B} = D_u \mathfrak{B} + D_u^T \mathfrak{B} = D_u \mathfrak{B} + a_u'''. \quad (18)$$

После умножения первого уравнения системы (17) слева на Φ^{-T} получаются окончательные уравнения движения отдельного тела в виде:

$$\begin{aligned} M^q w + M^{qu} \mathfrak{B} + k_q &= F_q + R_q; \\ M^{quT} w + M^u \mathfrak{B} + k_u &= F_u + R_u. \end{aligned} \quad (19)$$

Использованы обозначения [4, 9, 10]:

$$\begin{aligned} w &= \begin{Bmatrix} \mathfrak{B} \\ \mathfrak{C} \end{Bmatrix}, \quad F = Q'_u + F_u^{elast}, \\ M^q(q, u) &= \begin{bmatrix} mE & m\tilde{\rho}_C^T \\ m\tilde{\rho}_C & J_C \end{bmatrix}, \quad M^{qu}(q, u) = \begin{bmatrix} \int_V \mu D_u dV \\ \int_V \mu \tilde{\rho} D_u dV \end{bmatrix}, \\ M^u(u) &= \int_V \mu D_u^T D_u dV, \\ k_q &= \begin{Bmatrix} \tilde{\omega} \tilde{\omega} m \rho_C + 2 \int_V \mu \tilde{\omega} \mathfrak{B} dV + \int_V \mu a_u''' V \\ \tilde{\omega} J_C \omega + 2 \int_V \mu \tilde{\rho} \tilde{\omega} \mathfrak{B} dV + \int_V \mu \tilde{\rho} a_u''' V \end{Bmatrix}, \\ k_u &= \int_V D_u^T \mu (\tilde{\omega} \tilde{\omega} \rho + 2 \tilde{\omega} \mathfrak{B} + a_u''') dV. \end{aligned} \quad (20)$$

В работе [9] уравнения (19) получаются на основе принципа возможных перемещений. Там же отмечено, что в случае “отвердевания”, когда $\mathfrak{B}(M) \equiv 0$, и при записи уравнений относительно центра масс, когда $\rho_C \equiv 0$, они превращаются в динамические уравнения Ньютона-Эйлера для абсолютно твердого тела:

$$\begin{aligned} m \mathfrak{B} &= f^{акт} + f^{реакт}, \\ J_C \mathfrak{C} + \tilde{\omega} J_C \omega &= m^{акт} + m^{реакт}. \end{aligned} \quad (21)$$

4. Прямой метод формирования уравнений движения системы тел.

Рассмотрим, следуя [3], уравнения движения системы твердых тел. Уравнения (19) иногда называются полудискретизированными [9], чтобы подчерк-

нуть, что лишь относительные ускорения \mathbb{R} были выражены через обобщенные ускорения \mathbb{R}

Выразим столбец w_i ускорений каждого тела через его обобщенные координаты q_i и производные от них, подобно тому, как в выражениях (3):

$$w_i = \begin{Bmatrix} \mathbb{R}_i \\ \mathbb{R}_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} D_i \mathbb{R}_i + a_i'' \\ B_i \mathbb{R}_i + \varepsilon_i'' \end{Bmatrix} = \Phi_i \mathbb{R}_i + w_i'' . \quad (22)$$

Если теперь подставить это значение w_i в уравнение (19) для i -го тела и выполнить суммирование по всем телам системы, то получим уравнения движения системы в обобщенных координатах

$$\sum_{i=1}^n \left(\begin{bmatrix} \Phi_i^T M_i^T \Phi_i & O \\ O & O \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O & \Phi_i^T M_i^{qu} \\ M_i^{qu^T} \Phi_i & M_i^u \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \mathbb{R}_i \\ \mathbb{R}_i \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{Bmatrix} \Phi_i^T Q_i^q \\ Q_i^u \end{Bmatrix} , \quad (23)$$

где обозначено:

$$\begin{aligned} Q_i^q &= F_i^q - k_i^q - M_i^q w_i''; \\ Q_i^u &= F_i^u - k_i^u - \int_{V_i} D_i^{u^T} \mu_i (a_i'' + \tilde{\varepsilon}_i'' \rho_i) dV_i . \end{aligned} \quad (24)$$

В матричной записи уравнения (23) можно записать в виде:

$$\left[M^q + M^{qu} \right] \mathbb{R} = Q , \quad (25)$$

где x – глобальный столбец обобщенных координат системы, являющийся объединением всех столбцов $x_i = \{q_i^T, u_i^T\}^T$ с учетом глобальной нумерации координат.

Заметим, что силы реакций в эти уравнения не входят, что является следствием идеальности связей в шарнирах. Отметим, что все элементы уравнений движения (23) вычисляются с использованием только алгебраических матричных операций умножения и сложения. Матрицы производных D_i , B_i , входящие в соотношения (22) и далее через матрицы Φ_i в (23), можно вычислить без использования дифференцирования, используя рекуррентные соотношения для цепочек тел. Описанный формализм предложен Робертсоном и Виттенбургом [11], Вукобратовичем [12], а также Шиленом и Кройцером [13].

Для системы в виде цепочки из n тел число алгебраических операций для вычисления (трудоемкость вычисления) составляющих M^q и M^{qu} матрицы масс системы (25) равно соответственно $O(n^3)$ и $O(n^2)$.

Описанные выше подходы к формированию разрешающих уравнений, изложенные в работе О.Н. Дмитроченко [3], обладают тем преимуществом, что позволяют максимально автоматизировать процесс составления систем уравнений, причем полученные системы достаточно экономны по объему и приспособлены для многовариантных исследований. Аналогичные технологии реализованы и в современных САЕ. Кроме того, могут применяться более эффективные алгоритмы [3] формирования уравнений движения [14-24].

СТРУКТУРА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНО-МОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА. На рис. 2 приведена структура специального программного комплекса для исследования реакции корпуса на комплекс динамических и импульсных воздействий. По исходному набору параметров $P_{вх}$ по соответствующим алгоритмам строится параметрическая модель исследуемого транспортного средства. Интерфейсные и командные модули, созданные под определенный комплекс задач, передают текущую модель в САЕ-систему высокого уровня, вычитывают результаты моделирования и передают их на процедуру изменения текущих параметров. При удовлетворении определенных критериев и ограничений система выдает требуемый набор параметров $P_{вых}$, в противном случае параметры изменяются, и цикл исследований повторяется.



Рис.2. Общая структура программно-модельного комплекса для исследования реакции транспортных средств специального назначения при динамических и импульсных воздействиях ($P_{вх}$, $P_{вых}$ – входной и выходной наборы параметров)

Преимущество предложенной структуры программно-модельного комплекса состоит в обеспечении управляемости всех этапов исследований и перенастройке системы на новый объект исследований за счет переработки незначительного количества программных модулей и параметрических моделей. При этом сохраняется эффективность и функциональность, присущие универсальным программным САЕ-системам.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ. Для демонстрации данной методики используем класс боевых машин, подобных БТР-80. Для того чтобы иметь возможность в широких пределах изменять как структуру, так и толщины броневых листов, был создан полностью параметрический корпус, позволяющий варьировать любой его геометрический размер (рис.3).

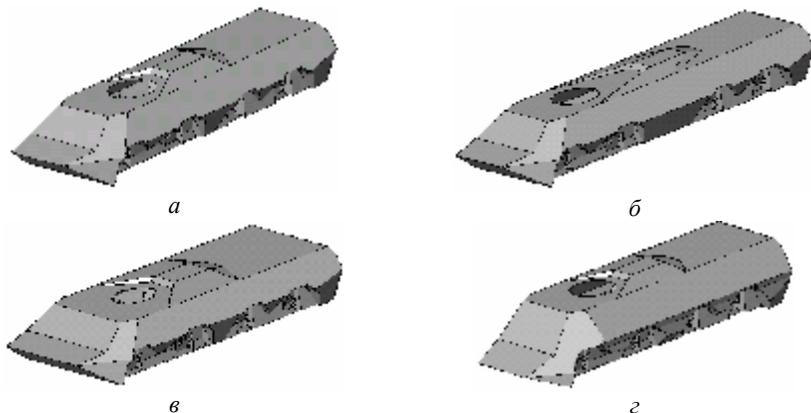


Рис.3. Пример параметрично заданного корпуса при варьировании базовых параметров

Помимо изменения геометрической модели корпуса транспортного средства, в предлагаемом программно-модельном комплексе имеется возможность изменения характеристик боевого модуля. Для этого была создана модель достаточно универсального боевого модуля, позволяющая варьировать его массово-инерционные характеристики, темп стрельбы, усилие отдачи, направление стрельбы. Выстрел моделируется сосредоточенной импульсной нагрузкой, прикладываемой в некоторый момент времени, либо серией импульсов для моделирования стрельбы очередью. Величина прикладываемой силы, направление стрельбы и количество выстрелов также являются величинами параметрическими.

В ранее представленных работах [25, 26] разрабатывалась методика проведения многовариантного динамического анализа, в связи с чем производилось моделирование движения транспортного средства, прохождения полосы препятствий, стрельбы. Рассматривались такие аспекты как исследование динамических особенностей поведения подвески машины, согласование ее характеристик с характеристиками боевого модуля (рис.4, 5), особую роль при этом занимал алгоритм взаимодействия различных специализированных программных комплексов.

При исследовании динамики поведения реальных транспортных средств на практике применяются три принципиально различных подходы:

1. испытание на вибростенде;

2. тарированные полосы препятствий для оценки динамических свойств подвески;
3. полоса препятствий на реальной местности.



Рис.4. Примеры установки разных схем боевого модуля

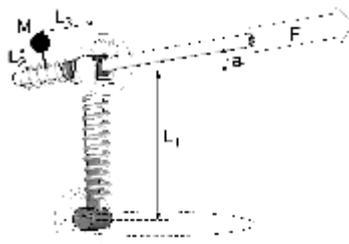
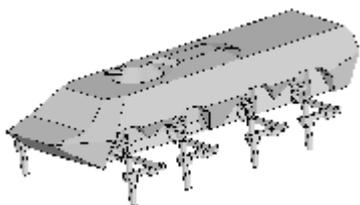


Рис.5. Схема модели боевого модуля

В связи с этим было произведено численное моделирование вибростенда, тарировочной полосы и полосы препятствий (рис.6).



Вибрационная нагрузка



Тарировочная трасса

Рис.6. Моделирование динамических воздействий

При решении поставленной задачи предлагается воспользоваться пакетом SolidWorks, в который интегрируется CosmosMotion. Представленные программные комплексы были выбраны из соображений простоты их использования и достоверности получаемых результатов. Далее для проверки достоверности результатов можно воспользоваться так называемым “тяжелым” программным продуктом ADAMS/Solver, в котором реализовано больше численных алгоритмов, а также присутствует больше настроек для контроля получаемых результатов.

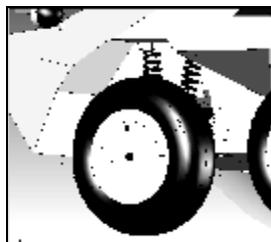
Особой сложностью расчетов динамики движения по поверхности было наличие контактного взаимодействия между моделируемым грунтом и колесами, поскольку заранее неизвестен характер их совместного поведения, взаимного проникновения, отрыва, проскальзывания. Подобное взаимодействие в динамике машин описывается так называемыми неголономными связями. При наличии контакта задача становится существенно нелинейной, а, значит, требует многошагового решения и контроля состояния на каждом шаге расчета.

Подобное обстоятельство очень сильно влияет на время расчета, которое зависит от числа таких контактных пар (в исследуемом случае колес восемь).

При переходе от геометрической модели к физической упругие свойства торсионного вала моделировались торсионными пружинами, упруго-демпфирующие свойства амортизаторов – соответственно линейными пружинами и демпферами. Движение задавалось путем придания каждому колесу некоторой скорости вращения (рис.7).



Задание жесткостно-демпфирующих свойств



Задание движения

Рис.7. Моделирование подвески

Преобразование геометрической модели в физическую осуществлялась программным комплексом CosmosMotion, который, в свою очередь, полностью интегрируется непосредственно в оболочку SolidWorks, что чрезвычайно удобно, т.к. позволяет практически в интерактивном режиме одновременно изменять как геометрию модели, так и ее физические характеристики. Более того – отсутствуют ошибки передачи, сохраняется дерево модели. Также CosmosMotion способен генерировать командный файл для ПК MSC.ADAMS. Таким образом передается не только геометрическая модель, а и наложенные на ее элементы связи, а также физические характеристики (массово-инерционные характеристики, пружины, демпферы, вращающие моменты, заданные контактные пары и прочее). Таким образом, после импортирования в ADAMS получается практически готовая к постановке на расчет модель.

Следует отметить, что для каждого вида расчета есть существенные и несущественные параметры, характеризующиеся степенью важности с точки зрения адекватности описания происходящего процесса. Так, для анализа динамического поведения системы наиболее важными являются массово – инерционные, упруго-демпфирующие характеристики (амортизаторы, торсионные валы), внешние вынуждающие воздействия. Геометрия в данном виде расчета интересует нас с точки зрения правильной взаимосвязи вышеописанных параметров. Прочностной расчет, напротив, требует максимальной детализации геометрических и физических свойств.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ РАСЧЕТОВ. В качестве результатов тестовых расчетов рассмотрим графики, полученные при нагружении колес

машины вибрационной нагрузкой на “испытательном стенде” (рис.8-10) и при расчете динамики машины на тарировочной полосе (рис 11-14).

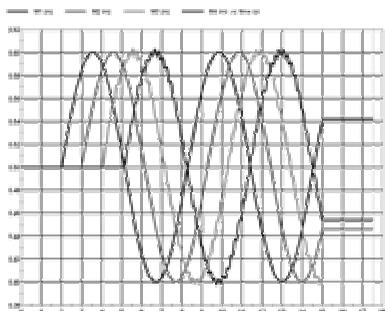


Рис.8. Распределение кинематической нагрузки, приложенной к мостам машины

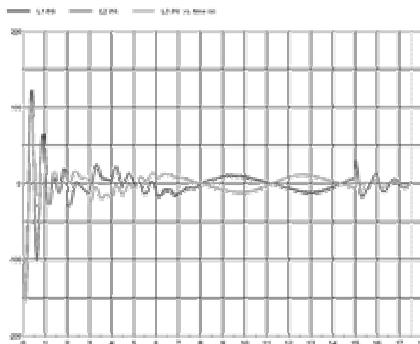


Рис.9. Усилия в амортизаторах на 1-м и 2-м мостах

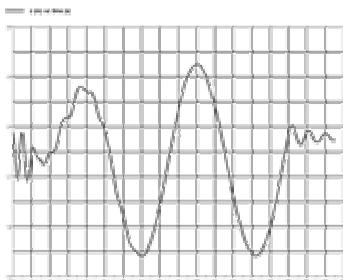


Рис.10. Перемещения башни

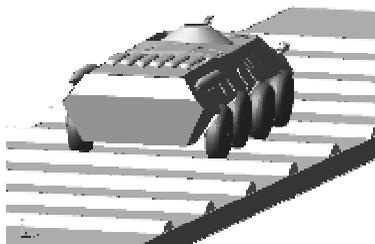


Рис.11. Тарировочная полоса препятствий



Рис.12. Перемещений первого моста

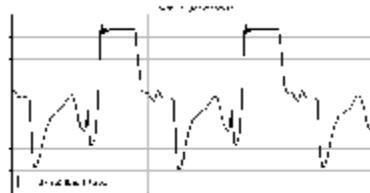


Рис.13. Усилия в амортизаторах первого моста

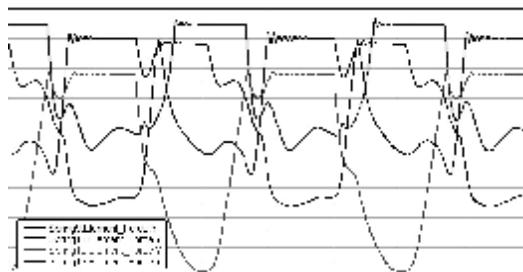


Рис.14. Реактивные силы в амортизаторах 4-х мостов

В качестве результатов расчета динамики исследуемого транспортного средства (рис.15, 16) показаны несколько графиков (рис. 17-20) изменений полученных характеристик корпуса и подвески от единичного выстрела.

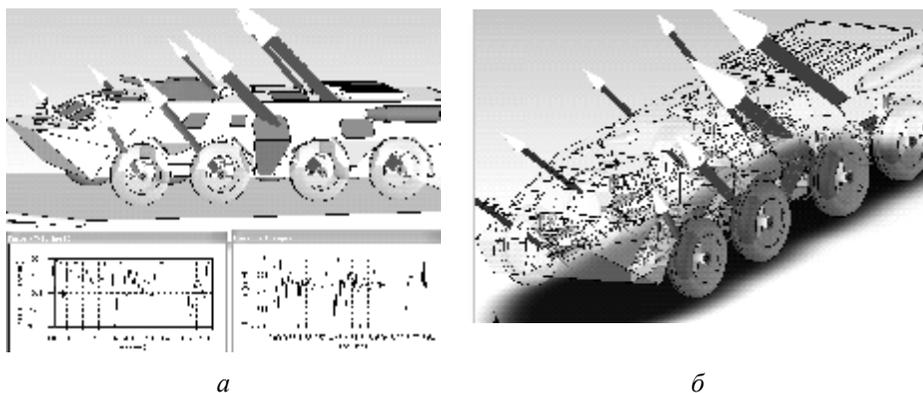


Рис.15. Прохождение полосы препятствий: реакции на элементе узла подвески

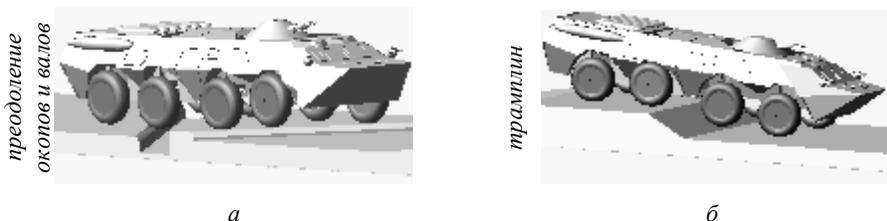


Рис.16. Прохождение полосы препятствий: виды препятствий

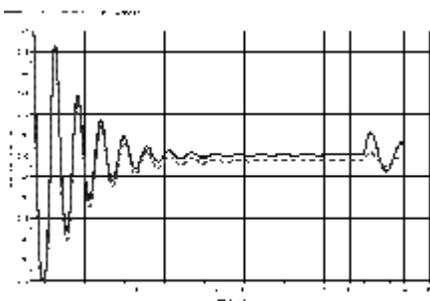


Рис.17. Удлинения амортизаторов (пунктир – на 1-м мосте; сплошная линия – на 2-м мосте)

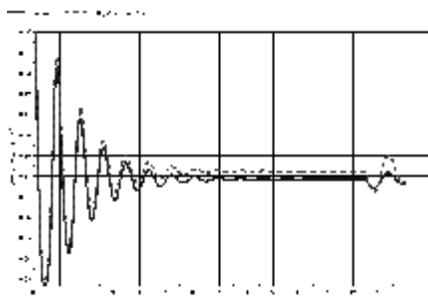


Рис.18. Удлинения амортизаторов (пунктир – на 3-м мосте; сплошная линия – на 4-м мосте)

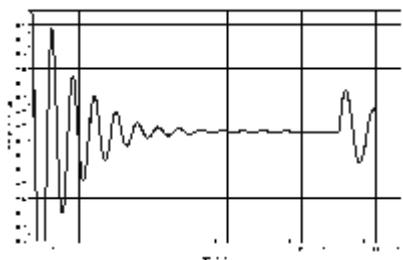


Рис.19. Перемещения контрольной точки носа

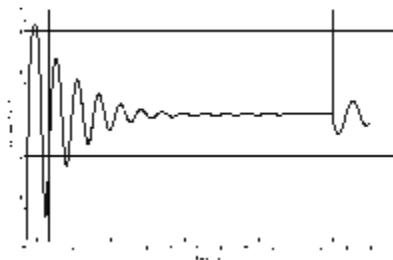


Рис.20. Ускорения контрольной точки башни

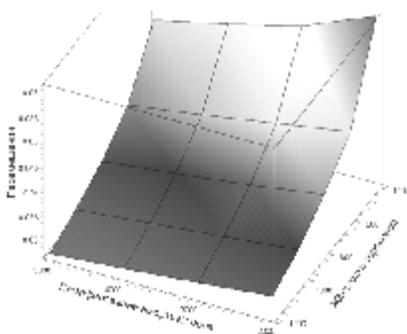


Рис.21. Качественный вид поверхности вертикальных перемещений точки носа в зависимости от параметров подвески

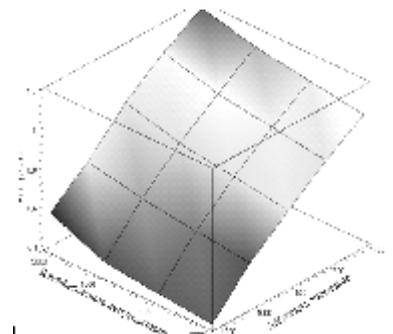


Рис.22. Качественный вид поверхности вертикальных ускорений на башне в зависимости от параметров подвески

После проведения серии расчетов с одиночным выстрелом были построены графики качественных зависимостей перемещений, ускорений, удлинений амортизаторов и угла закрутки торсионов в зависимости от жесткостно-демпфирующих параметров торсионного вала (рис.21-22). Качественный вид изменения длины амортизатора 4-го моста при стрельбе с различным ее темпом приведен на рис.23-26. Расчет начинается из положения равновесия машины.

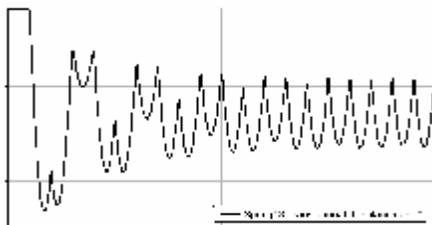


Рис.23. Изменение длины амортизатора 4-го моста при стрельбе со скоростью 240 выстр./мин.

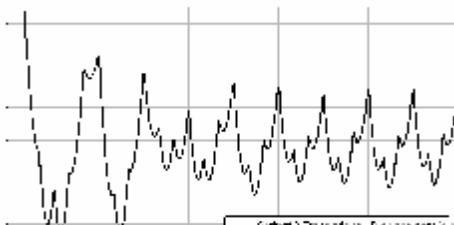


Рис.24. Изменения длины амортизатора 4-го моста при стрельбе со скоростью 360 выстр./мин.

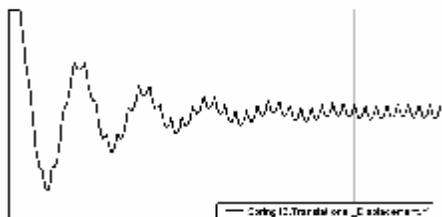


Рис.25. Изменение длины амортизатора 4-го моста при стрельбе со скоростью 480 выстр./мин.

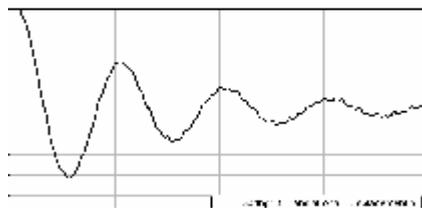


Рис.26. Изменения длины амортизатора 4-го моста при стрельбе со скоростью 960 выстр./мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложенная математическая модель для описания динамики транспортных средств во многом опирается на идеи, изложенные в работе [3]. В то же время непосредственное наполнение параметров системы дифференциальных уравнений осуществляется с применением современных мощных CAD/CAE-систем. Для решения задач синтеза предложен новый параметрический подход, естественным образом включающий в себя анализ динамики. Созданный программно-модельный комплекс способен автоматизировать процессы моделирования различных транспортных средств специального назначения.

Предложенный подход и созданный программно-модельный комплекс планируется в дальнейшем развивать, дополнять и применять для анализа динамики транспортных средств специального назначения и напряженно-деформированного состояния их корпусов.

Список литературы. 1. *Большаков А.К., Емельянов В.В., Фесенко А.Ф., Семененко Н.В.* О выборе и использовании бронетанковой техники в качестве базы под подвижные вооружения и военную технику // *Механiка та машинобудування*. – 2004. – №1. – С.94-98. 2. *Пелешко Е.В.* Применение обобщенно-параметрического подхода к анализу корпусов транспортных средств специального назначения // *Механiка та машинобудування*. – 2005. – №1. – С.83-87. 3. *Дмитроченко О.Н.* Эффективные методы численного моделирования динамики нелинейных систем абсолютно твёрдых и деформируемых тел // Дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. – Москва, 2003. – 125 с. 4. *Дмитроченко О.Н., Погорелов Д.Ю.* Упругие балочные элементы в системах твердых тел // *Динамика и прочность транспортных машин / Сб. тр. под ред. В.И. Сакало*. – Брянск: БГТУ, 2000. – С. 18-27. 5. *Likins P.W.* Modal method for analysis of free rotations of spacecraft // *AIAA Journal* 5(7), 1967, 1304-1308. 6. *Shabana A.A.* Dynamics of Multibody Systems, 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1998. 7. *Маркеев А.П.* Теоретическая механика: Учеб. пособие для университетов. – М.: Наука, 1990. – 416 с. 8. *Погорелов Д.Ю.* Введение в моделирование динамики систем тел: Учеб. пособие. – Брянск: БГТУ, 1997. 9. *Simeon B.* DAEs and PDEs in elastic multibody systems // *Numerical Algorithms* 19 (1998), Baltzer Sc. Publ. – P.235-246. 10. *Ambrósio J.A.C., Pereira M.F.O.S.* Flexible multibody dynamics with nonlinear deformations: Vehicle dynamics and crashworthiness applications. – Computational methods in mechanical systems: mechanism analysis, synthesis and optimization / J. Angeles, E. Zakhariiev (eds.). – NATO ASI series. Series F, Computer and systems sciences. – Vol. 161. – PP.382-420. 11. *Roberson R.E., Wittenburg J.* A dynamical formalism for an arbitrary number of interconnected rigid bodies, with reference to the problem of satellite attitude control // *Proc. 3rd Congr. Int. Fed. Autom. Control*, Butterworth. – Vol. 1 – Book 3. – Paper 46 D. London, 1967. 12. *Vukobratović M., Frank A. A., Jurčić D.* On the stability of biped locomotion // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* BME-17. – 1970. – P.25-36. 13. *Chiehlen W., Kreuzer E.* Rechnergestütztes Aufstellen der Bewegungsgleichungen gewöhnlicher Mehrkörpersysteme // *Ing.-Archiv* 46. – 1977. – P.185-194. 14. *Featherstone*

R. Robot dynamics algorithms // Kluwer, Boston. – 1987. **15.** *Верещакін А.Ф.* Компьютерное моделирование динамики сложных механизмов роботов-манипуляторов // Инженерная кибернетика. – Вып. 6. – С.65-70. **16.** *Schwertassek R.* Flexible bodies in multibody systems. – Computational methods in mechanical systems: mechanism analysis, synthesis and optimization / Jorge Angeles, Evrim Zakhariiev. p. cm. – NATO ASI series. Series F, Computer and systems sciences. – Vol. 161. – PP.329-363. **17.** *Eichberger A.* Simulation von Mehrkörpersystemen auf parallelen Rechnerarchitekturen // Universität-Gesamthochschule Duisburg, Fachbereich Maschinenbau, Dissertation. – 1993. **18.** *Eichberger A.* Transputer-Based Multibody System Dynamic Simulation, Part I: The Residual Algorithm – A Modified Inverse Dynamic Formulation, Part II: Parallel Implementation – Results // Mechanics of Structures and Machines, 22(2). – 1994. – PP.211-261. **19.** *Погорелов Д.Ю., Дмитроченко О.Н.* Модификации метода отдельных тел для синтеза и решения уравнений движения систем тел // Тез. докл. междунар. конф. стран СНГ «Молодые учёные — науке, технологиям и профессиональному образованию». – М.: 2000, ч.3. – С.87-90. **20.** *Gear CW., Gupta G.K., Leimkuhler B.* Automatic integration of Euler-Lagrange equations with constraints // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 12(13). – 1985. – PP.77-90. **21.** *Pogorelov D.* Differential-algebraic equations in multibody system modeling // Numerical Algorithms 19, Baltzer Science Publishers. – 1998. – PP.183-194. **22.** *Pogorelov D.* Some developments in computational techniques in modeling advanced mechanical systems // Proc. of IUTAM Symposium on Interaction between Dynamics and Control in Advanced Mechanical Systems, D. H. van Campen (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. – 1997. – PP.313-320. **23.** *Schiehlen W.* (Ed.) Multibody Systems Handbook, Springer. – Berlin, 1990. **24.** *Дмитроченко О.Н.* Методы составных и отдельных тел для моделирования динамики систем твёрдых тел и гибридных систем // Междунар. Межвуз. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и магистрантов / Сб. материалов. – Гомель, ГГТУ им. П. О. Сухого, 2001. – С.260-263. **25.** *Пелешко Є.В., Грабовський А.В., Танченко А.Ю.* Використання сучасного програмного забезпечення для розрахунку динамічних характеристик підвіски БТР-80 // Наук. – практ. конф. (22 – 23 грудня 2004 р.) "Стан і розвиток Сухопутних військ на сучасному етапі. Проблеми розвитку озброєння та техніки Сухопутних військ". – Харків: ХІТВ НТУ "ХПІ", 2005. – С.161 – 164. **26.** *Грабовський А.В., Танченко А.Ю.* К вопросу о проведении многовариантного динамического анализа поведения подвески ЛБМ при стрельбе // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск "Машиноведение и САПР". – 2005. – №53. – С.59-66.

Поступила в редакцію 20.04.06

УДК 621.875

Ю.Б. ГУСЕВ, ОАО “Головной специализированный конструкторско-технологический институт”, г. Мариуполь

К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЯ ПМГ-20

Зроблений аналіз напружено-деформованого стану елементів металоконструкції перевантажувача ПМГ-20 від різних комбінацій діючих навантажень.

We were carried out the stressed-deformed state of “ПМГ-20” over-loader metalwork elements for different combination of active loads.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Повышение эффективности эксплуатации рудно-грейферных перегружателей может быть достигнуто за счет увеличения надежности и срока службы их металлоконструкций. Надежность работы металлоконструкции определяется