

назначения // Механіка та машинобудування. – 2005. – №1. – С.83–87. 5. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Часть 2. – М.: Высшая школа, – 1966. – 411 с. 6. Дуценко В.В., Якименко И.И. Математическое моделирование колебаний поддресоренного корпуса многоопорной колёсной машины по критериям „простота-адекватность” // Механіка і машинобудування. – 2004. – №2. – С.139-147. 7. Грунѣв С.Г., Багарсуков С.И., Мормило Я.М. Расчётно-экспериментальная оценка системы поддресорирования колёсных машин с подвеской типа БТР-70 // Механіка і машинобудування. – 2004. – №2. – С.128-133. 8. <http://morozov.com.ua>.

Поступила в редколлегию 12.11.2005

УДК 539.3:623.438

Г.Д.ГРИЦЕНКО, ГП “Завод им. Малышева”

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА РЕАКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПРИМЕРЕ КОРПУСА БРОНЕТРАНСПОРТЕРА

У статті запропонована математична модель для дослідження напружено-деформованого стану синтезу корпусів легкоброньованих машин, що піддаються дії зусиль стрільби. Розроблена математична модель містить опис всіх аспектів досліджуваних динамічних процесів, всіх якісних і кількісних особливостей самої досліджуваної динамічної системи, а також, при її подальшому розвитку, методи її оптимізаційного проектування.

In the article a mathematical model is offered for research of the stressedly-deformed state of synthesis of lightweight vehicles hulls, which are subjected to exertion of firing. The developed mathematical model contains description of all aspects of explored dynamic processes, all qualitative and quantitative features of the explored dynamic system, and also, at its further development, methods of its optimization design.

Введение. В настоящее время особую актуальность приобретает задача модернизации легкобронированных боевых машин (ЛБМ). Это требует, в свою очередь, моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) корпусов ЛБМ при действии различных нагрузок [1, 2].

Разработка математического аппарата для моделирования НДС корпусных элементов легкобронированных боевых машин не исчерпывает задачу анализа прочностных и жесткостных характеристик. Проблема заключается в том, что, как правило, аналитическое решение получаемой начально-краевой задачи возможно только для ограниченного числа областей сравнительно простой формы. Для корпусов боевых машин, имеющих чрезвычайно сложную структуру и состоящих из большого количества панелей разной толщины и формы, элементов усиления, вырезов, люков и т.д., применимы только численные методы решения. Из всех их разнообразия наиболее мощным и приспособленным для такого класса конструкций является метод конечных элементов (МКЭ) [3-5]

Метод конечных элементов, применяемый для исследования напряженно-деформированного состояния нагруженных деталей и узлов транспортных средств (ТС) и ориентированный на эффективное использование компьютеров, является мощным современным средством приближенного решения разнообразных задач математической физики. Для него характерны:

- широкий диапазон применимости;
- инвариантность по отношению к конструкции и механическим характеристикам материалов;
- простота учета взаимодействия конструкции с внешней средой.

В то же время анализ НДС элементов транспортных средств имеет свою специфику, обусловленную особенностями конструкции и нагружения ТС.

Анализ публикаций по тематике исследования напряженно-деформированного состояния корпусных элементов легких по массе боевых машин дает возможность сделать следующие выводы.

1. В литературе описаны общие подходы к решению задач данного класса при помощи метода конечных элементов.

2. Присутствует большое количество универсальных программных продуктов, позволяющих решать большинство задач в полуавтоматизированном режиме.

3. Отсутствуют методы и системы автоматизированного исследования прочности и жесткости корпусов боевых бронированных машин.

4. Практически не описаны в литературе методы создания специализированных систем для анализа и синтеза корпусов боевых бронированных машин по критериям прочности, жесткости, массы, тактико-технических характеристик.

5. Приведенные в публикациях решения частных задач дают представления только об отдельных сторонах исследуемого процесса реакции корпуса на импульсное воздействие. Однако положительным моментом является то, что в этих работах продемонстрирована сама принципиальная возможность решения задач анализа напряженно-деформированного состояния такого класса конструкций.

Таким образом, проведенный обзор состояния вопроса позволяет выделить направления исследований и определить направления исследований, определив тот достигнутый базовый научный уровень, от которого можно отталкиваться при постановке и решении задач исследований напряженно-деформированного состояния корпусов ЛБМ.

Постановка задач исследования. Анализ мировых и отечественных тенденций проектирования боевых модулей легких по массе боевых бронированных машин и методов исследования напряженно-деформированного состояния их корпусов позволяет заключить, что:

1. модули вооружения имеют тенденцию к росту общей массы, калибра вооружений темпа и углов стрельбы, что приводит к необходимости анализа напряженно-деформированного состояния корпусов при различных вариантах нагружения с целью рационального выбора конструктивных схем и па-

раметров при их проектировании;

2. в настоящее время для отечественного бронетанкостроения одним из наиболее актуальных направлений является развития направления модернизации боевых бронированных машин с установкой современных модулей вооружения;

3. практически отсутствуют в научной литературе методики исследования влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние корпусов легкобронированных машин, а также синтеза корпусов по критериям прочности и жесткости для обеспечения ТТХ за счет рационального выбора параметров проектируемых корпусов.

4. Для проектируемых, особенно модернизируемых конструкций корпусов боевых бронированных машин характерны растущая напряженность конструктивных элементов, а также самые неблагоприятные сочетания режимов боевого применения.

5. В настоящее время метод конечных элементов получил огромное развитие, в том числе реализацию в виде самых мощных CAE-систем, взаимодействующих с CAD-системами (Pro/ENGINEER, SolidWorks, CATIA, UG). В то же время отсутствуют специализированные интегрированные системы автоматизированного анализа и синтеза элементов корпусов боевых бронированных машин по критериям прочности и жесткости, что сдерживает решение этих задач параллельно и взаимосвязанно с процессами их проектирования.

Для решения поставленной задачи анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза элементов корпусов легкобронированных боевых машин по критериям прочности необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка комплексной математической модели напряженно-деформированного состояния и динамических процессов в корпусе боевой машины при действии системы импульсов от усилия отдачи при производстве выстрелов.

2. Разработка специализированной интегрированной системы анализа и синтеза элементов корпусов боевых машин по критериям прочности, жесткости, обеспечения заданных тактико-технических характеристик.

3. Разработка множества параметрических моделей элементов корпусов боевых бронированных машин для вариативного анализа прочности и жесткости элементов конструкций.

4. Обеспечение тактико-технических характеристик проектируемых корпусов легкобронированных машин путем рационального выбора конструктивных схем и параметров на основе многовариантных исследований напряженно-деформированного состояния при варьировании конструктивных схем, конструктивных параметров ТТХ боевых модулей, а также режимов боевого применения.

5. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов корпусов боевых бронированных машин и оценка достоверности численных моделей на основе экспериментальных исследований.

Разработка рекомендаций по выбору рациональных вариантов модернизации корпуса и внедрение результатов исследований в производство.

Исходным пунктом исследований является разработка математической модели для исследования напряженно-деформированного состояния корпуса ЛБМ как сложной пространственной конструкции, подвергающейся воздействию импульсов различной интенсивности и частоты.

Формулировка соотношений для конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния корпусов ЛБМ. При исследовании напряженно-деформированного состояния корпусов ЛБМ с применением метода конечных элементов приходится решать не только краевую задачу, но и начально-краевую при действии импульсных сил. В этом случае все искомые и заданные функции зависят не только от пространственных координат, но и от времени. В этом же случае разрешающая система уравнений приобретает вид [3-5]:

$$M\ddot{\mathbf{u}} + C\dot{\mathbf{u}} + K\mathbf{u} = \mathbf{Q}, \quad (1)$$

где M – матрица масс;

C – матрица демпфирования;

K – матрица жесткости;

\mathbf{u} – вектор узловых перемещений;

$\dot{\mathbf{u}}$ – вектор узловых скоростей;

$\ddot{\mathbf{u}}$ – вектор узловых ускорений;

\mathbf{Q} – вектор узловых нагрузок.

Для решения данной системы предполагается использовать метод Ньюмарка:

$$\dot{\mathbf{u}}_{n+1} = \dot{\mathbf{u}}_n + \left[(1 - \delta)\ddot{\mathbf{u}}_n + \delta\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} \right] \Delta t, \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n + \dot{\mathbf{u}}_n \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{\mathbf{u}}_n + \alpha \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} \right] \Delta t^2, \quad (3)$$

где α, δ – параметры интегрирования метода Ньюмарка;

$\mathbf{u}_n, \mathbf{u}_{n+1}$ – вектор узловых перемещений,

$\dot{\mathbf{u}}_n, \dot{\mathbf{u}}_{n+1}$ – вектор узловых скоростей;

$\ddot{\mathbf{u}}_n, \ddot{\mathbf{u}}_{n+1}$ – вектор узловых ускорений в момент времени n и $n+1$ соответственно;

Δt – шаг интегрирования по времени метода Ньюмарка.

Используя пошагового представления решения по времени с применением формул (2), (3) дает возможность сформировать систему уравнений для определения искомых узловых параметров в последующий момент времени через их значения в предыдущий момент:

$$\begin{aligned} & \xi_0 M + \xi_1 C + K \mathbf{u}_{n+1} = \\ & = \mathbf{Q} + M(\xi_0 \mathbf{u}_n + \xi_2 \mathbf{u}_n' + \xi_3 \mathbf{u}_n'') + C(\xi_1 \mathbf{u}_n + \xi_4 \mathbf{u}_n' + \xi_5 \mathbf{u}_n''), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } \xi_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}; \xi_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}; \xi_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}; \xi_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1; \xi_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1; \xi_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right).$$

Здесь параметры ξ_i представляют собой коэффициенты в выражениях узловых скоростей и ускорений в момент времени t_{n+1} через узловые значения параметров в момент времени t_n :

$$\mathbf{u}_{n+1}'' = \xi_0 (\mathbf{u}_{n+1} - \mathbf{u}_n) - \xi_2 \mathbf{u}_n' + \xi_3 \mathbf{u}_n'', \quad (5)$$

$$\mathbf{u}_{n+1}' = \mathbf{u}_n' - \xi_6 \mathbf{u}_n'' + \xi_7 \mathbf{u}_{n+1}'', \quad (6)$$

$$\text{где } \xi_6 = \Delta t(1 - \delta), \xi_7 = \delta \Delta t.$$

Таким образом, совокупность решений последовательности систем уравнений (4) с учетом (5), (6) представляет собой общее решение начально-краевой задачи. Вся система соотношений (1) – (6) формирует математическую модель для анализа напряженно-деформированного состояния корпусов легкобронированных машин при динамическом воздействии реактивных сил при производстве выстрелов.

Моделирование реакции системы на ударное воздействие импульсов.

Естественно, что решение системы уравнений (1) при числе конечных элементов, исчисляемом десятками и сотнями тысяч, и количестве шагов по времени, исчисляемом сотням и тысячами, представляет собой довольно громоздкую задачу. В то же время качественные особенности исследуемого процесса можно предварительно исследовать на примере одномассовой динамической системы, подвергающейся действию системы периодических импульсов.

Рассмотрим подход, описанный в [6] для динамической системы с одной степенью свободы под действием набора импульсных нагрузок, следующих периодически, поведение которой описывается уравнением

$$m \ddot{v} + cv = 0, \quad (7)$$

где m, c, v – скаляры: масса, жесткость и обобщенная координата, описывающие поведение системы.

Его решение

$$v = \frac{S}{m p} \sin pt, \quad (t > 0), \quad (8)$$

($p = \sqrt{c/m}$) – частота свободных колебаний), которое удовлетворяет как уравнению (7), так и начальным условиям (т.е. условиям возникновения дви-

жения непосредственно после исчезновения начального импульса):

$$v = 0, \quad \mathfrak{v} = \frac{S}{m}. \quad (9)$$

Движение, вызываемое только следующим первым импульсом, можно получить из того же выражения (8) в виде:

$$v = \frac{S}{m p} \sin p(t - T), \quad (t > T). \quad (10)$$

Аналогично можно найти результат действия следующих импульсов. Чтобы получить общее движение, нужно сложить эти “парциальные” движения. Для одного типичного интервала времени $[nT, (n+1)T]$, т. е. между моментами приложения n -го и $(n+1)$ -го импульсов, имеем

$$\begin{aligned} v &= \frac{S}{m p} \sin pt + \sin p(t - T) + \sin p(t - 2T) + \dots + \sin p(t - nT) = \\ &= \frac{S}{m p} \sum_{k=1}^{k=n} \sin p(t - kT). \end{aligned} \quad (11)$$

Для начала этого интервала времени, т. е. при $t = nT$, по выражению (11) находим

$$v = \frac{S}{m p} \sum_{k=0}^{k=n-1} \sin(n - k)pT \quad (12)$$

Одним из эффективных способов исследования качественных особенностей поведения данной системы описаны в [6]. Рассмотрим один из периодов T , приняв за начало отсчета времени момент исчезновения последнего импульса. В течение рассматриваемого периода колебания являются свободными и описываются решением

$$v = A \cos pt + B \sin pt, \quad (13)$$

Если v_0 – начальное смещение и \mathfrak{v}_0 – начальная скорость, то постоянные A и B равны

$$A = v_0, \quad B = \frac{\mathfrak{v}_0}{p}, \quad (14)$$

решение (13) можно записать в виде

$$v = v_0 \cos pt + \frac{\mathfrak{v}_0}{p} \sin pt. \quad (15)$$

Дифференцируя по времени t , находим скорость

$$\mathfrak{v} = -v_0 p \sin pt + \mathfrak{v}_0 \cos pt . \quad (16)$$

В конце этого периода, непосредственно перед приложением очередного импульса (т. е. $t = T$), имеем

$$v_1 = v_0 \cos pT + \frac{\mathfrak{v}_0}{p} \sin pT , \quad (17)$$

$$\mathfrak{v}_1 = -v_0 p \sin pT + \mathfrak{v}_0 \cos pT . \quad (18)$$

Сразу после приложения очередного импульса смещение v сохранит свое значение (17) :

$$v_2 = v_1 = v_0 \cos pT + \frac{\mathfrak{v}_0}{p} \sin pT , \quad (19)$$

но скорость мгновенно изменится на величину S/m , и при учете выражения (18) составит

$$\mathfrak{v}_2 = -v_0 p \sin pT + \mathfrak{v}_0 \cos pT + \frac{S}{p} . \quad (20)$$

Вследствие предполагаемой *периодичности* процесса величины v_2 и \mathfrak{v}_2 должны быть равны величинам v_0 и \mathfrak{v}_0 , т. е.

$$v_0 = v_0 \cos pT + \frac{\mathfrak{v}_0}{m} \sin pT , \quad (21)$$

$$\mathfrak{v}_0 = -v_0 p \sin pT + \mathfrak{v}_0 \cos pT + \frac{S}{m} . \quad (22)$$

Таким образом, получена система двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными v_0 и \mathfrak{v}_0 ; решив ее, найдем

$$v_0 = \frac{S}{2m p} \operatorname{ctg} \frac{pT}{2}, \quad \mathfrak{v}_0 = \frac{S}{2m} . \quad (23)$$

и закон движения (13) принимает вид ($0 < t < T$)

$$v = \frac{S}{2m p} \left(\sin pt + \cos pt \cdot \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right) . \quad (24)$$

Периодичность достигнута вследствие игнорирования заданных начальных условий (т. е. условий, относящихся к начальному моменту, непосредственно перед приложением первого импульса); в реальных системах благодаря демпфированию (которое не было учтено) в конце концов осуществляется именно такое периодическое движение. Впрочем, при желании можно отра-

зять в решении и действительно заданные начальные условия. Пусть в начальный момент времени заданные смещение и скорость соответственно составляют v_0^* и \dot{x}_0^* . Конечно, они отличаются от величин v_0 и \dot{x}_0 , которые относятся к чисто периодическому процессу и даны выражениями (24). Запишем тождества:

$$\begin{cases} v_0^* = v_0 + \left(v_0^* - \frac{S}{2mp} \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right) \\ \dot{x}_0^* = \dot{x}_0 + \left(\dot{x}_0 - \frac{S}{2m} \right). \end{cases} \quad (25)$$

Первые слагаемые правых частей отвечают периодическому (с периодом T) движению (24), а вторые слагаемые послужат причиной свободных колебаний (с периодом $2\pi/p$)

$$v^* = \left(v_0^* - \frac{S}{2mp} \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right) \cos pt + \left(\frac{\dot{x}_0^*}{p} - \frac{S}{2mp} \right) \sin pt. \quad (26)$$

Здесь время t отсчитывается от начала процесса. Таким образом, движение будет описываться суммой решений (24) и (26). Вторая часть имеет практическое значение в течение небольшого промежутка времени вблизи начала процесса. Полезно проанализировать результат, содержащийся в выражении (24). Прежде всего заметим, что если

$$\frac{pT}{2} = n\pi,$$

где n – целое, то $\left| \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right| \rightarrow \infty$ и амплитуды перемещений стремятся к бесконечности, т. е. наступает ударный резонанс. Если $\omega = 2\pi/T$ – угловая частота приложения импульсов, то условие ударного резонанса приобретает вид

$$\omega = \frac{p}{n}. \quad (27)$$

При всех иных соотношениях частот отклонения оказываются конечными. Наибольшее отклонение системы согласно (24) равно

$$v_{\max} = \frac{S}{mp} \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{pT}{2}} = \frac{S}{2mp} \left| \sin \frac{\pi p}{\omega} \right|. \quad (28)$$

Так как дробь $\frac{S}{2mp}$ есть максимальное отклонение, вызываемое одним мгновенным импульсом S , то выражение

$$\beta = \frac{1}{2 \left| \sin \frac{\pi p}{\omega} \right|} \quad (29)$$

можно назвать *коэффициентом влияния повторности*. На рис. 1 изображена зависимость β от отношения частот ω/p . Как видно, здесь возможно неограниченно большое число ударных резонансов (соответственно формуле (27)). Наименьшее возможное значение β равно $1/2$.

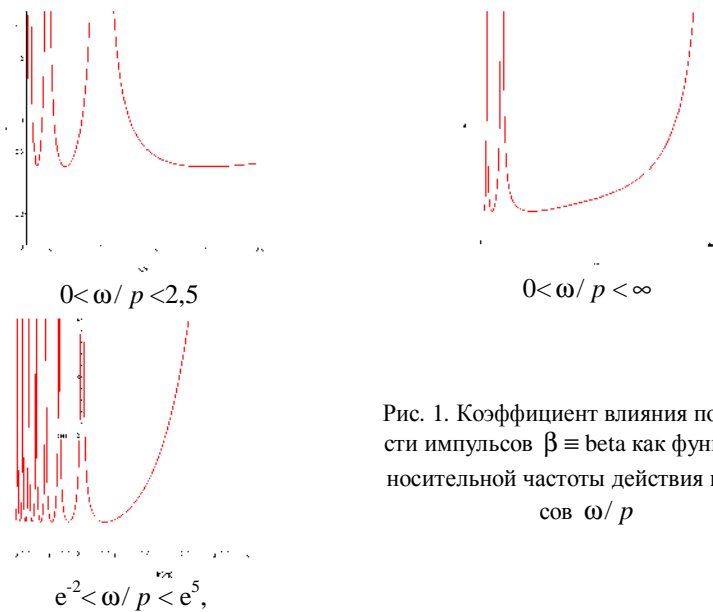


Рис. 1. Коэффициент влияния повторности импульсов $\beta \equiv$ beta как функция относительной частоты действия импульсов ω/p

масштаб полулогарифмический

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента чувствительности к действию системы импульсов от обратной относительной частоты возбуждения p/ω . Видно, что рост амплитуды установившихся колебаний происходит как с уменьшением периода действия импульсов, так и при его росте (при условии $p \approx \omega \cdot n$, где $n = 1, 2, 3, \dots$).

На рис. 3 – 4 приведены характерные динамические процессы: вдали от ударного резонанса и вблизи резонанса.

Качественный анализ приведенных картин показывает, что и характер переходного процесса, и его длительность, и характер установившегося дви-

жения очень сильно зависят от соотношения ω/p . Поскольку реальная динамическая система (исследуемый корпус бронетранспортера в процессе модернизации) обладает густым спектром собственных частот, причем этот спектр изменяется при внесении изменений в конструкцию, то полученные характеристики не могут быть применены для количественного, а только для качественного анализа.

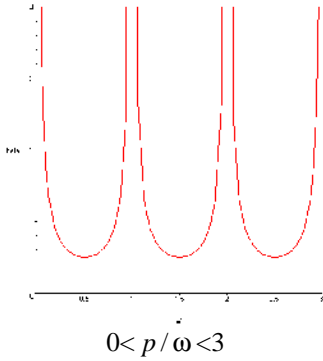


Рис. 2. Коэффициент влияния повторности импульсов $\beta \equiv \text{beta}$ как функция относительного периода действия импульсов p/ω

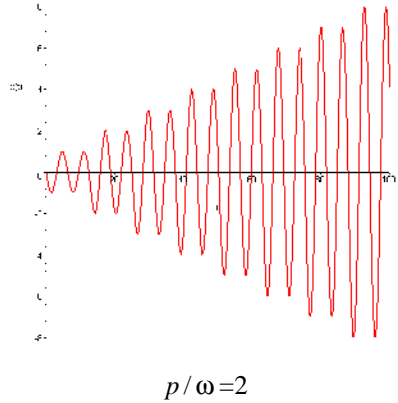


Рис. 3. Характерное временное распределение перемещения v при ударном резонансе

В то же время уже заранее можно предсказать характерные особенности динамических процессов в корпусе модернизируемого бронетранспортера БТР-80 при действии импульсов сил:

1) после относительно короткого переходного процесса при несовпадении ω с $p_i \cdot n$, где i – номера частот (от 1 до N_r), n – натуральное число, при

$$\omega_{\text{л}} \ll \omega \ll \omega_{\text{п}} \quad (\text{здесь}$$

$$\omega_{\text{л}} = \max_{i,n} \{p_i \cdot n : p_i \cdot n < \omega\};$$

$$\omega_{\text{п}} = \max_{i,n} \{p_i \cdot n : p_i \cdot n > \omega\}, \text{ на-}$$

ступает практически установившийся режим движения с преобладанием процесса с собственной частотой, ближайшей к частоте вынуждения;

2) при близости или совпадении ω с p_i , переходной процесс растягивается, а уста-

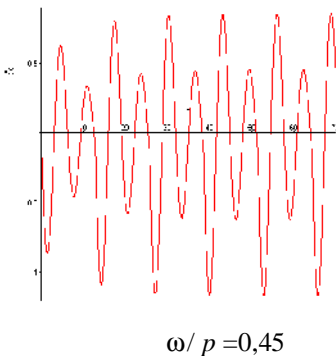


Рис. 4. Характерное временное распределение перемещения v при $\omega/p = 0,45$

новившийся представляет собой или биение, или почти периодический процесс с большой амплитудой;

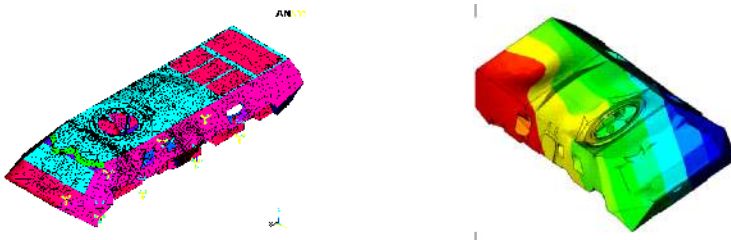
3) при $\omega \gg p_{N_e} \cdot n$ амплитуда установившихся колебаний растет практически пропорционально частоте вынуждающих импульсов.

Качественное сравнение результатов аналитического и численного моделирования реакции корпуса на импульсное воздействие. Поскольку при моделировании динамической системы одномассовым эквивалентом допускается чрезмерное упрощение массово-жесткостных свойств, которые в действительности представляют собой пространственные распределения, а не параметры, необходимо провести *качественное* сравнение результатов, полученных на основе упрощенной модели, с данными численного моделирования методом конечных элементов.

На рис. 5 приведены картины, характеризующие напряженно-деформированное состояние корпуса БТР-80УМ в момент времени после выстрела с некоторым эталонным усилием отдачи, на рис. 6-11 – характерные графики распределения вертикальных перемещений и угловых отклонений индикаторных точек БТР во времени.

Кроме диаграмм распределения перемещений и напряжений в фиксированный момент времени, построенная конечно-элементная модель позволяет наблюдать изменение контролируемых величин в индикаторных точках: вертикальное и суммарное перемещение оси цапф, а также вертикальные и суммарные перемещения задней и передней точки погона и др.

Как видно из представленных диаграмм, корпус в целом и отдельные его точки испытывают перемещения, в качественном отношении совпадающие с полученными ранее картинами распределений (см. рис. 3, 4). Видно, что при выбранном соотношении параметров корпуса ЛБМ и темпа стрельбы ударного резонанса не наблюдается. Это дает основание ввести некоторые типовые характеристики процесса деформирования корпуса в разных точках (рис. 12).



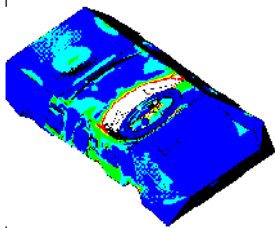


Рис. 5. Конечно-элементная модель корпуса бронетранспортера БТР-80 и диаграммы распределения перемещений и напряжений

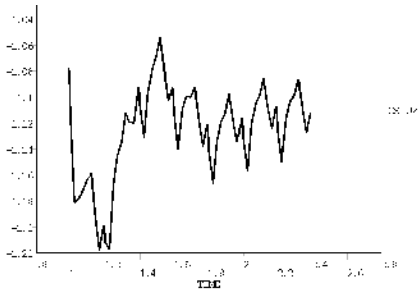


Рис. 6. Вертикальные перемещения оси цапф в зависимости от времени

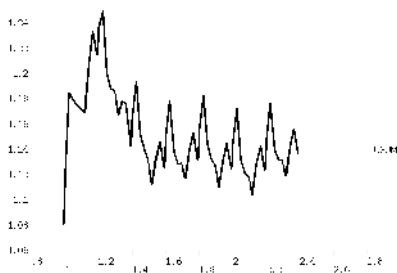


Рис. 7. Суммарные перемещения оси цапф в зависимости от времени

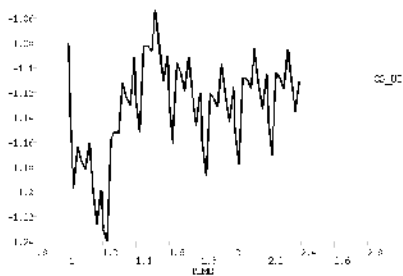


Рис. 8. Вертикальные перемещения задней точки погона в зависимости от времени

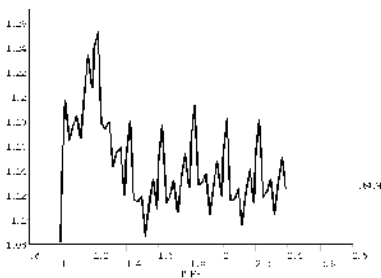


Рис. 9. Суммарные перемещения задней точки погона в зависимости от времени

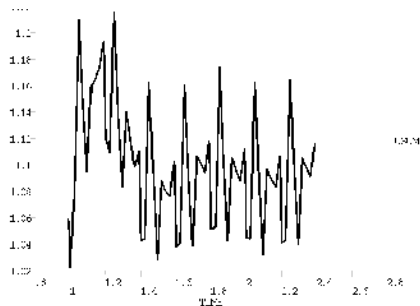
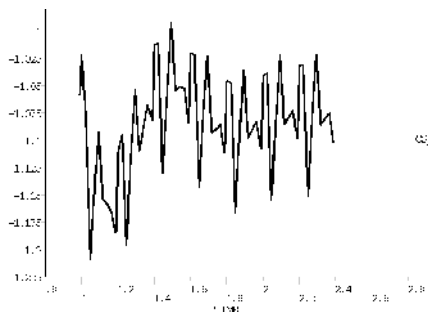


Рис.10. Вертикальные перемещения передней точки погона в зависимости от времени

Рис.11. Суммарные перемещения задней точки погона в зависимости от времени

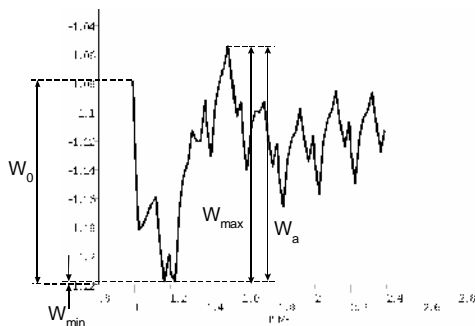


Рис. 12. Диаграммы вертикальных перемещений оси цапф во времени: w_0 – начальное значение вертикального перемещения оси цапф при действии сил тяжести в начальный момент времени; w_{\min} – минимальное значение вертикального перемещения оси цапф; w_{\max} – максимальное значение вертикального перемещения оси цапф; w_a – амплитуда колебаний оси цапф при производстве серии выстрелов

При этом отслеживаются различные характеристики переходного процесса в корпусе. Установившийся процесс отличается меньшими амплитудами колебательного процесса.

Таким образом, в принципе получено удовлетворительное качественное соответствие распределений на моделях различной размерности. Это свидетельствует о том, что отдельные характерные показатели реакции исследуемой системы на серию импульсных воздействий можно выявить на небольших моделях.

Заключение. В статье предложена математическая модель для исследования напряженно-деформированного состояния синтеза корпусов легкобронированных машин, подвергающихся действию усилий стрельбы. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Предложенная математическая модель отличается от использованных ранее для исследования напряженно-деформированного состояния корпусов легкобронированных машин строгой математической формулировкой задачи анализа прочностных и жесткостных характеристик при периодических импульсных воздействиях.
2. Разработанная математическая модель отличается тем, что содержит эле-

менты качественного анализа реакции системы на импульсные воздействия.

3. Проведенный предварительный анализ позволяет выделить три типа поведения исследуемой динамической системы при длительном импульсном воздействии и малом вязком трении: ударный резонанс; нерезонансный режим; сверхвысокочастотное импульсное воздействие.

4. Получено полное качественное соответствие результатов моделирования реакции корпуса БТР-80 с применением упрощенной и подробной динамических его моделей.

Для полного решения задачи многовариантного анализа и синтеза предложенная математическая модель нуждается в дальнейшем развитии:

- необходим инструмент автоматизированного генерирования численных моделей (включая геометрическую информацию, тактико-технические характеристики боевых модулей, ТТХ модернизируемого бронетранспортера) по ограниченному набору основных параметров;
- требуется создание средств “конденсации” прочностных и жесткостных параметров по результатам расчета динамических процессов.

Таким образом, впервые поставлена в строгой математической постановке задача анализа напряженно-деформированного состояния корпусов модернизируемых легкобронированных машин под действием усилий стрельбы.

Разработанная математическая модель содержит описание всех аспектов исследуемых динамических процессов, всех качественных и количественных особенностей самой исследуемой динамической системы, а также, при ее дальнейшем развитии, методы ее оптимизационного проектирования.

Список литературы. 1. *Холявский Л. Г.* Энциклопедия бронетехники. Гусеничные боевые машины // 2001. – 656 с. 2. *Шунков В. Н.* Бронетехника. – Минск: Попурри. – 2000. – 445 с. 3. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541с. 4. *Стренг Г., Фикс Дж.* Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 349 с. 5. *Норри Д., де Фриз Ж.* Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981.- 304 с. 6. *Пановко Я.Г., Губанова И.И.* Устойчивость и колебания упругих систем. – М.: Наука, 1979. – 384 с.

Поступила в редколлегию 02.12.2005

УДК 621.01

Е.И.ЗИНЧЕНКО, А.А.ЗАРУБИНА, канд. техн. наук, НТУ “ХПИ”

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТЕЙШИХ ДВУХПОВОДКОВЫХ МЕХАНИЗМОВ И СРАВНЕНИЕ ИХ С КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ БАЗОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

В статті наведені результати кінематичного дослідження механізмів другого порядку: шарнірно-