

Е.В. ПЕЛЕШКО, НТУ "ХПИ"

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ КОРПУСА БРОНЕТРАНСПОРТЕРА НА ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В даній статті розглядається розв'язання проблеми експрес-аналізу напружено-деформованого стану корпусів транспортних засобів спеціального призначення. Приведені результати експериментального і числового розв'язання задачі моделювання реакції корпусу БТР-80 на імпульсну дію.

The solution of problem of express-analysis of stressed-deformed state of transports vehicles of the special setting corps is examined in this article. The results of experimental and numerical solution of modelling task of BTR-80 corps reaction on an impulsive action are given.

1. Состояние вопроса. В условиях рыночной экономики для отечественного бронетанкостроения актуальной является задача проектирования конструкций боевых машин нового поколения, а также разработки схем модернизации существующих изделий с целью обеспечения ими новых качеств и высоких тактико-технических характеристик. При разработке вариантов модернизации легких по массе боевых машин (БТР-60, БТР-70, БТР-80, МТ-ЛБ, БМП-2) и оснащении их при этом новыми боевыми модулями возникает важная задача обеспечения прочности и жесткости легкобронированных корпусов. Поскольку корпусные элементы данных машин в процессе боевого использования подвергаются действию целого комплекса динамических и импульсных воздействий, то исходная задача приводит к необходимости исследования напряженно-деформированного состояния пространственных пластинчато-стержневых конструкций при различных вариантах конструктивного усиления, с различными вариантами вооружения и силового агрегата, а также при варьировании режимов боевого применения.

Отдельным вопросом во всем комплексе задач расчетно-экспериментального исследования корпусов бронетранспортеров является экспериментальное определение реакции корпуса на серию импульсных воздействий, а также экспериментальное определение собственных частот и колебаний. Ниже описана методика и результаты проведенных экспериментальных исследований реакции макета фрагмента корпуса БТР на данные воздействия и сравнение их с результатами численных исследований, полученных на основе метода конечных элементов (МКЭ) [1].

2. Постановка задачи. При модернизации техники специального назначения необходимо обеспечить заданную прочность и жесткость корпуса для выполнения машиной поставленных задач. Основным способом повышения жесткости и прочности корпусов БМП и БТР долгое время являлся традиционный способ, заключающийся в увеличении толщины

броневых листов, вследствие чего увеличивается масса машины, что приводит к ещё более глубокой модернизации, затрагивающей ходовую часть и силовую установку. Такие машины не способны преодолевать водные преграды на плаву и создают проблемы при их транспортировке на большие расстояния. В работах [2-5] был предложен новый способ модернизации техники, заключающийся в подборе конструктивного решения для ужесточения корпуса боевой машины. При этом приходится проводить множество прочностных расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС).

Для идентификации параметров численных моделей и оценки точности расчетных схем корпусов боевых машин предлагается провести серию экспериментальных исследований, которые состоят в следующем:

- разработка методики экспериментальных исследований;
- изготовление макета бронекорпуса;
- определение реакции корпуса на импульсные воздействия;
- сравнение экспериментальных данных с численными.

3. Метод численного исследования корпуса. Для решения задач численного исследования динамических характеристик корпуса транспортных средств специального назначения наиболее применим метод конечных элементов [1]. Сущность метода конечных элементов состоит в том, что любую непрерывную величину, определенную на произвольном промежутке (напряжение, перемещение или температуру) можно аппроксимировать дискретной моделью.

При моделировании конструкция разбивается на части, геометрия которых может быть легко математически описана. Для моделирования корпусов транспортных средств используются стержневые и пластинчато-оболочечные примитивы: прямые линии, треугольники, прямоугольники. Получаемые подобласти имеют малые конечные размеры и называются конечными элементами (КЭ). КЭ контактируют друг с другом в узлах, к которым приводят также граничные условия для тела, распределенные поверхностные и объемные силы, и записываются условия равновесия. Внутри каждого элемента искомое решение аппроксимируется полиномами необходимой степени (как правило, первой – четвертой). Таким образом, напряженно-деформированное состояние элемента будет однозначно определяться узловыми перемещениями.

Для нахождения собственных частот и форм колебаний конструкции в конечно-элементной постановке уравнение форм собственных колебаний запишется в следующем виде [1]:

$$([K] - p^2[M]) \cdot [V] = 0, \quad (1)$$

где $[K]$ – матрица жесткости; $[M]$ – матрица масс; $[V]$ – вектор собственных форм.

Уравнение (1) определяет стандартную обобщенную проблему собственных значений. Этому вопросу посвящена обширная литература и разработано большое число алгоритмов ее решения.

Одним из наиболее надежных методов решения задачи о собственных значениях является метод Якоби, основная схема которого была разработана более ста лет назад. В результате решения обобщенной проблемы собственных значений методом Якоби мы получаем все собственные формы и частоты системы. Однако для больших конечно-элементных систем не требуется обычно нахождения всех собственных частот и форм, а только низших частот. Кроме того, при исследовании корпуса боевой машины размерность задачи такова, что использование данного метода для определения частот всей системы в целом было практически невозможно.

Наиболее эффективным для решений такой задачи является метод итераций в подпространстве. Этот метод, получивший особое развитие в последнее время, основан на комбинации других итерационных методов: одновременной векторной итерации; метода Релея-Ритца; свойствах последовательности Штурма. При этом на каждом шаге итерации для выбранного подпространства необходимо решать задачу на собственные значения меньшей размерности, чем размерность системы.

Поэтому был разработан алгоритм, в котором для определения собственных частот и форм:

- при тестовых расчетах (задачах небольшой размерности), а также для вычисления матриц жесткости и масс суперэлементов в методе синтеза форм, в случаях, если число учитываемых форм близко к числу степеней свободы суперэлемента, использовался метод Якоби;

- в задачах большой размерности или в случаях, когда необходимо найти относительно небольшое число собственных форм и частот по сравнению с размерностью системы, использовался метод итераций в подпространстве, причем решение задачи на собственные значения для подпространства находилось тем же методом Якоби.

Задача о собственных колебаниях может быть представлена в виде (2). В результате получаем матрицу динамической жесткости системы, не разрешенную относительно частоты, и проблема собственных значений здесь не является стандартной. Для данного случая предлагается определить собственные значения вычислением определителя $\det([Z(\omega)])$ на заданной пробной частоте ω с последующим уточнением, если произошла перемена знака определителя.

Основная идея метода итераций в подпространстве использует тот факт, что собственные векторы для задачи на собственные значения:

$$[K][V^s] = [\Lambda^s][M][V^s], \quad (2)$$

где $[\Lambda^s]$ – диагональная матрица s -собственных значений; $[V^s]$ – матрица s -векторов собственных форм, составляют ортогональный базис s -мерного подпространства, принадлежащего наименьшим s -собственным значениям операторов $[K]$ и $[M]$. Выбираемые начальные линейно-независимые векторы $[V_1^s]$ образуют подпространство, и итерации проводятся до тех пор, пока не будет получено искомое подпространство с точностью $\epsilon=10^{-m}$. Важное преимущество такого подхода в том, что число требуемых векторов зависит от близости начального подпространства к искомому, а не от того, насколько близок каждый начальный вектор к соответствующему искомому. Следовательно, эффективность алгоритма определяется выбором начальных s -векторов $[V_1^s]$. Если эти вектора представляют собой пространство, соответствующее наименьшим искомым собственным значениям, то итерация сходится за один шаг.

Собственная частота одномассовой системы определяется выражением

$$p = \sqrt{\frac{c}{m}}, \text{ где } c \text{ – жесткость, } m \text{ – масса системы. Так как конечно-элементная}$$

задача – это задача для системы дискретных масс и жесткостей, то, очевидно, что начальные вектора должны включать в себя те степени свободы, которые соответствуют наибольшим массам и наименьшим жесткостям. На основании этих рассуждений предлагается следующий алгоритм выбора начальных векторов:

$$\left\{ \begin{array}{l} [V_1^s] = 0; [Z] = 0; \\ V_1^j(i) = 1, i \rightarrow \min_{i=1}^n \left(\frac{k_{ii}}{m_{ii}}; i \neq Z(k), k = (\overline{1, j}) \right); \\ Z(j) = i, j = (\overline{1, s}). \end{array} \right. \quad (3)$$

Рассмотрим k -й шаг алгоритма метода итераций в подпространстве.

Первое приближение пространства собственных векторов $[\overline{V}_{k+1}^s]$ определяется из решения следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} [L][Y_k] = [V_k^s] \\ [Y_k] = [L]^T [V_{k+1}^s] \end{array} \right. \quad (4)$$

где $[K]=[L][L]^T$ – разложение на верхнюю и нижнюю треугольную матрицу; $[Y_k]$ – промежуточная матрица приближений собственных векторов.

Затем находим проекции матриц жесткости и масс на векторное пространство $[\overline{V}_{k+1}^s]$

$$\begin{cases} [\overline{K}_{k+1}] = [\overline{V}_{k+1}^S]^T [K] [\overline{V}_{k+1}^S]; \\ [\overline{M}_{k+1}] = [\overline{V}_{k+1}^S]^T [M] [\overline{V}_{k+1}^S], \end{cases} \quad (5)$$

где $[\overline{K}_{k+1}]$, $[\overline{M}_{k+1}]$ – проекции, соответственно, матриц жесткости и масс размерностью $s \times s$.

Для найденных проекций решается задача о собственных значениях и находится k -е приближение собственных значений

$$[\overline{K}_{k+1}][\Phi_{k+1}] - [\Lambda_k][\Phi_{k+1}][\overline{M}_{k+1}] = 0, \quad (6)$$

где $[\Lambda_k]$ – диагональная матрица собственных значений $\lambda_i, i = \overline{(1, s)}$.

Решение уравнения проводится методом Якоби. Окончателное $(k+1)$ -е приближение пространства собственных векторов определяется из следующего выражения

$$[V_{k+1}^S] = [M][\overline{V}_{k+1}^S][\Phi_{k+1}]. \quad (7)$$

Процесс итерирования оканчивается при выполнении условия

$$\frac{\lambda_i^{(k)} - \lambda_i^{(k-1)}}{\lambda_i^{(k)}} \leq \varepsilon, \quad (i = \overline{1, S}). \quad (8)$$

Для получения собственных векторов $[V]$ и соответствующих собственных значений $\lambda_i, (i = \overline{1, t}, t \leq \varepsilon)$, которые будем считать первыми t собственными векторами и значениями для задачи (1), проводим проверку по Штурму. Данная проверка использует свойство последовательности Штурма для следующей задачи:

$$[K][V] - \mu[M][V] = [L][D][L]^T. \quad (9)$$

Учитывая то, что мы получили искомые значения с точностью ε , предварительно находим область точных значений из следующей последовательности неравенств

$$\dots 1,01\lambda_{i-1}^k < 0,99\lambda_i^k < 1,01\lambda_i^k < 0,99\lambda_{i+1}^k. \quad (10)$$

Все собственные значения выше t -го порядка, для которого при просмотре (10) выполняется неравенство $1,01\lambda_{i+1}^k \geq 0,99\lambda_{i+2}^k$, считаем

неверными. Тогда $\mu = 1,01\lambda_i^k$, и если по результатам решения задачи выполняется условие (10), то найденные t решений будем считать точными.

Точное математическое доказательство данного метода отсутствует, однако многочисленная практика расчетов показала высокую эффективность и быструю сходимость. При этом для получения t нижних собственных значений с заданной точностью ϵ достаточно взять $\epsilon = t + S$. Объем используемой памяти значительно меньше, чем при решении методом Якоби.

Наиболее важные преимущества МКЭ:

- Варьируемость размеров элементов. Это позволяет укрупнить или измельчить сеть разбиения области на элементы при необходимости для достижения заданной точности при минимальном времени решения.
- Свойства материалов смежных элементов могут быть различными. Это позволяет применять метод к телам, состоящим из нескольких материалов.
- Криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов.
- Возможно рассмотрение граничных условий с разрывной поверхностной нагрузкой, а также смешанных граничных условий.

Алгоритм МКЭ позволяет составить общую программу для решения задач различного класса.

Основной недостаток МКЭ заключается в высоких требованиях к компьютеру. Необходимо иметь как можно больший объем оперативной и дисковой памяти и высокое быстродействие процессоров. В настоящее время развитие компьютерной техники практически устранило этот недостаток.

Для выбора наиболее рациональной модернизации корпуса транспортного средства специального назначения для обеспечения заданных прочности и жесткости необходимо провести очень большое количество расчетов при различных значениях параметров. В качестве параметров в данном случае выступают различные геометрические параметры (размеры), физические параметры (свойства материалов), силовые параметры (нагрузки), обусловленные режимами эксплуатации машины, а также структурные параметры (конструктивные решения модернизации).

Решение большого количества задач напряженно-деформированного состояния конструкции с использованием мощнейших систем автоматизированного проектирования, таких как ANSYS, ADAMS, COSMOS/M и других даже при современном аппаратном компьютерном обеспечении займет огромное количество времени.

Для экспресс-анализа напряженно-деформированного состояния корпусов транспортных средств специального назначения при варьировании параметров и конструктивных решений предлагается использовать комплексное решение – CAD/CAE-систему Pro/ENGINEER с интегрированной системой автоматизированного анализа Pro/Mechanica. Данный способ позволяет в полной мере использовать возможность

параметризации модели в САПР-системе Pro/ENGINEER для решения задачи синтеза. Решение задачи анализа НДС в этой системе служит для экспресс-оценки выбора оптимальных параметров и конструктивных решений, так как модуль анализа Pro/Mechanica не является полностью сертифицированным.

4. Методика и результаты расчетно-экспериментального исследования. Для подтверждения достоверности численных моделей и расчетного модуля САПР Pro/Mechanica, использующихся в работах [2-5] для анализа напряженно-деформированного состояния корпусов транспортных средств специального назначения, а также проведения многовариантных расчетов для выбора оптимальных параметров и структурных схем корпусов был проведен комплекс расчетно-экспериментальных исследований при помощи созданного программно-модельного комплекса. Данный комплекс включает в себя следующие элементы, приведенные на рис. 1.

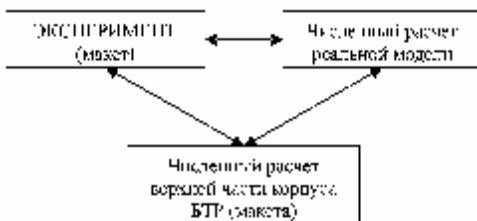


Рис. 1. Схема расчетно-экспериментальных исследований

Объектом исследований выступил корпус БТР-80. Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен макет верхней части корпуса БТР-80, изображенный на рис. 2. Выбор именно этой части обусловлен тем, что ранее проведенные исследования показали большую восприимчивость верхней части корпуса к действию импульсных нагрузок.

В ходе исследований был проведен эксперимент по нахождению собственных частот модели корпуса БТР. Для измерения частотных характеристик использовался анализатор спектра вибраций и датчик ДН-3-М1 (рис. 3). В ходе эксперимента были получены таблицы перемещений, скоростей и ускорений во времени в характерных точках 1-9, изображенных на рис. 2.

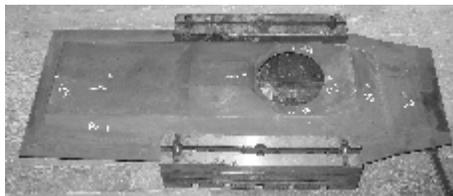


Рис. 2 Модель верхней части корпуса БТР-80, закрепленная в специальном приспособлении

Для наглядного анализа полученных результатов была написана программа для построения графиков распределения перемещений, скоростей

и ускорений во времени. Графические результаты эксперимента представлены на рис. 4-14.

По экспериментальной модели корпуса была построена геометрическая модель в системе автоматизированного проектирования Pro/ENGINEER. Были проведены расчеты собственных частот конструкции и реакции конструкции на импульсные воздействия.



Рис. 3. Анализатор спектра вибраций и датчик ДН-3-М1

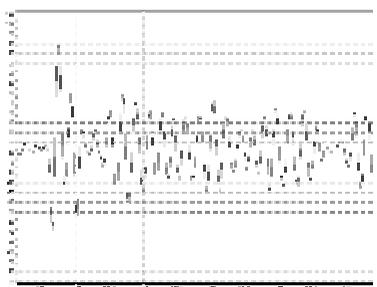
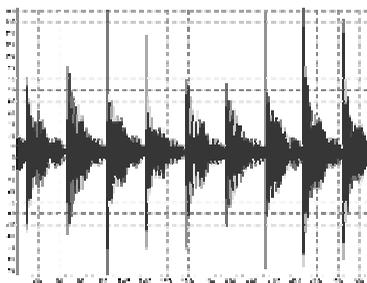


Рис. 4. Графики распределения во времени ускорений в точке 1 (эксперимент)

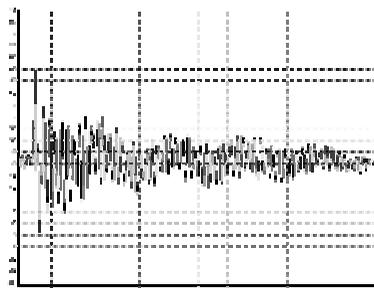
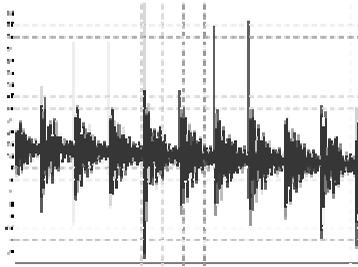


Рис. 5. Графики распределения скоростей в точке 1 (эксперимент)

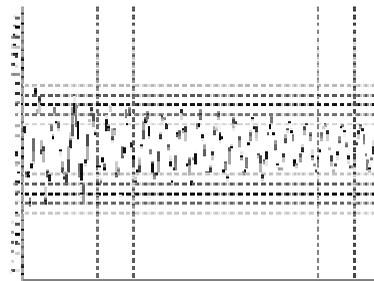
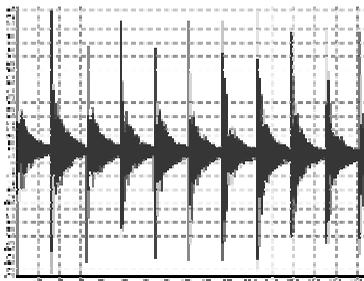


Рис. 6. Графики распределения ускорений в точке 2 (эксперимент)

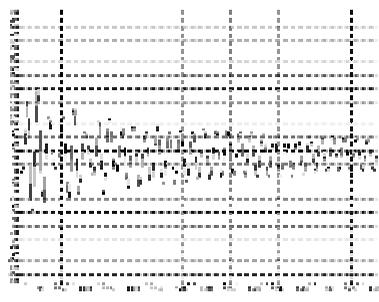
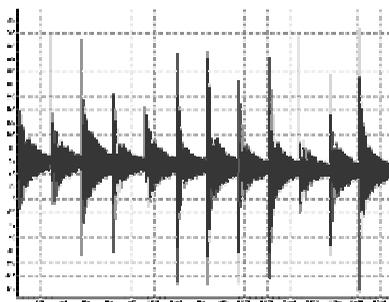


Рис. 7. Графики распределения скоростей в точке 2 (эксперимент)

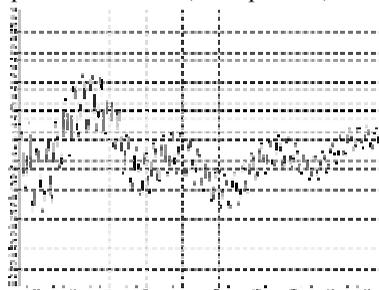
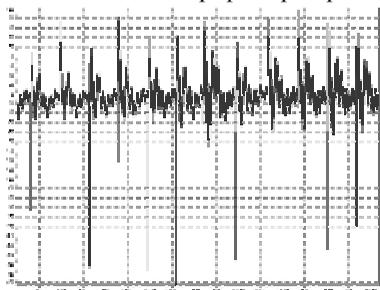


Рис. 8. Графики распределения перемещений в точке 2 (эксперимент)

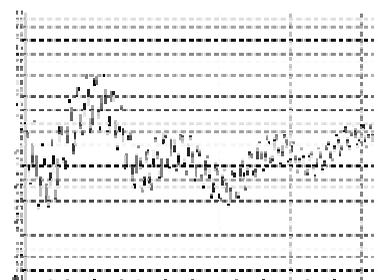
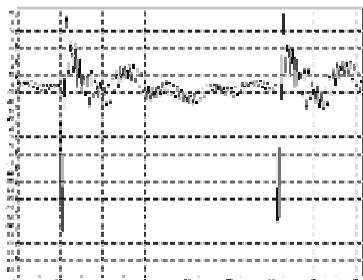


Рис. 9. Графики распределения перемещений в точке 3 (эксперимент)

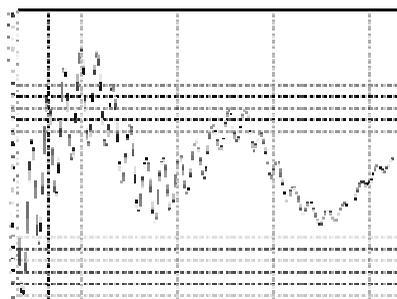
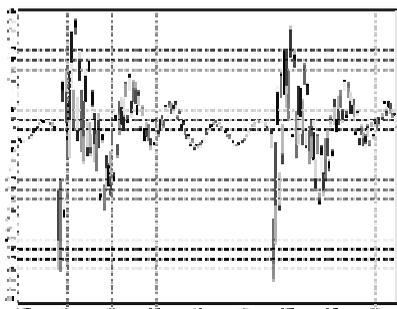


Рис. 10. Графики распределения перемещений в точке 4 (эксперимент)

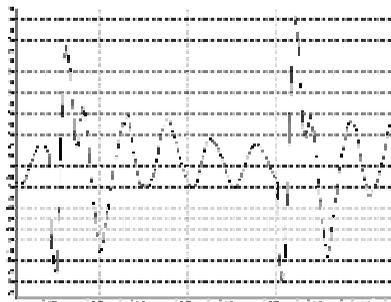
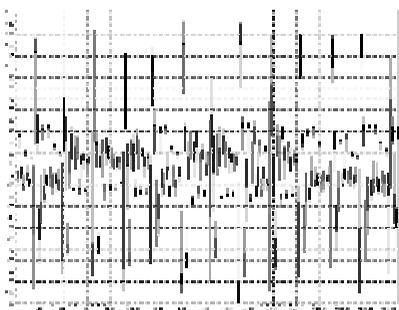


Рис. 11. Графики распределения перемещений в точке 5 (эксперимент)

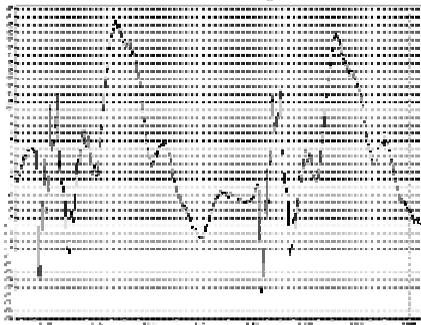
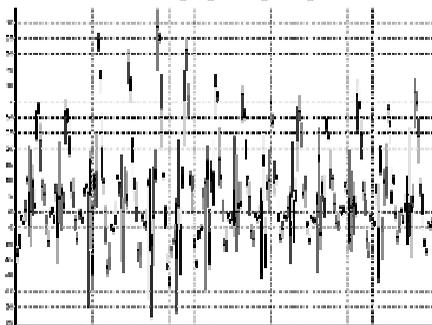


Рис. 12. Графики распределения перемещений в точке 6 (эксперимент)

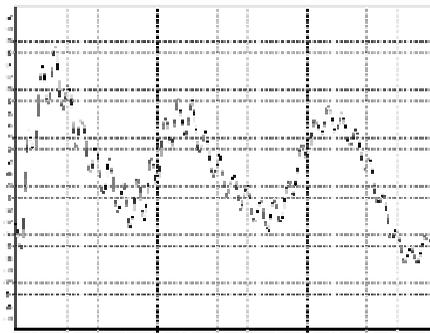
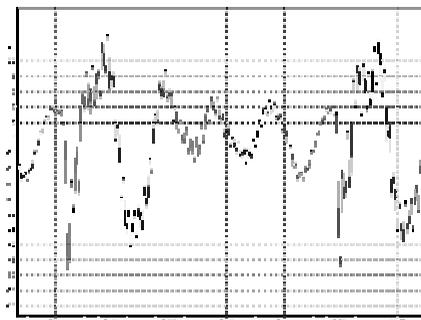


Рис. 13. Графики распределения перемещений в точке 8 (эксперимент)

На рис. 15-18 приведены некоторые формы колебаний макета верхней части корпуса бронетранспортера.

На рис. 19-21 приведены характерные распределения ускорений, скоростей и перемещений точек макета корпуса БТР-80, полученных численно при моделировании действия на корпус импульсного воздействия от боевого модуля.

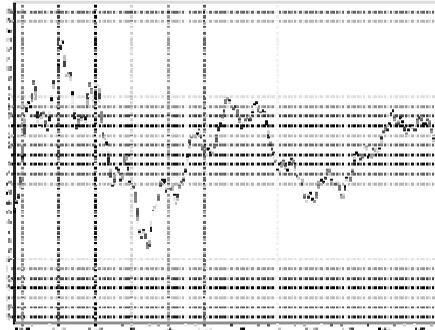
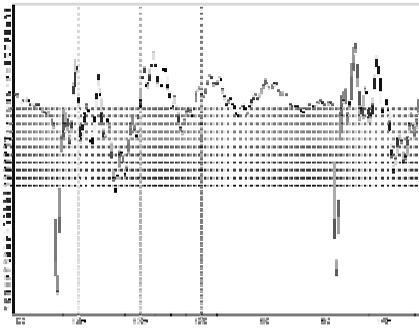


Рис. 14 Графики распределения перемещений в точке 9 (эксперимент)



Рис. 15. 1-я форма колебаний, 79 Гц



Рис. 16. 4-я форма колебаний, 266 Гц



Рис. 17. 9-я форма колебаний, 418 Гц



Рис. 18. 3-я форма колебаний, 237 Гц

Сравнение частот, полученных численным путем и при проведении эксперимента, приведено в таблице.

Таблица

Собственные частоты исследуемой конструкции, Гц

Экспериментально определенные частоты	Численно определенные частоты	Экспериментально определенные частоты	Численно определенные частоты
–	79	–	266
190-210	237	420-440	418

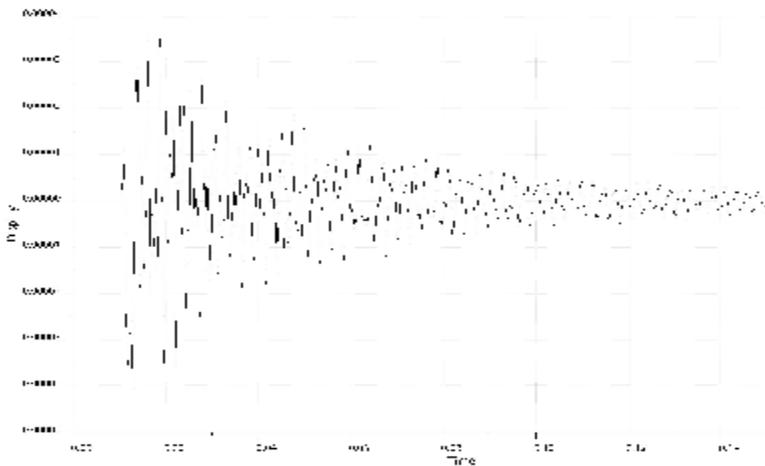


Рис. 19. Перемещения точки 2 при импульсном воздействии

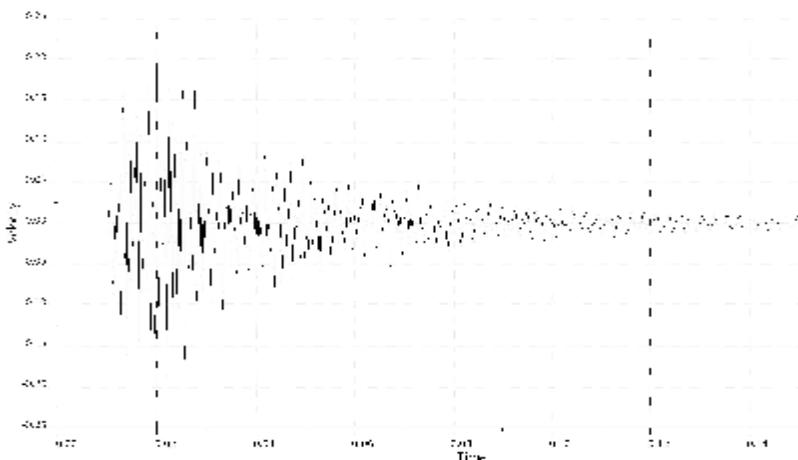


Рис. 20. Скорости точки 2 при импульсном воздействии

Выводы. В ходе проведенных исследований были проведены следующие работы:

- предложен метод экспресс-анализа напряженно-деформированного состояния и последующего синтеза корпусов транспортных средств специального назначения;
- построен программно-модельный комплекс для решения задачи нахождения собственных частот и форм модели верхней части корпуса БТР;
- проведен эксперимент по решению задачи нахождения собственных частот и форм колебаний корпуса БТР.

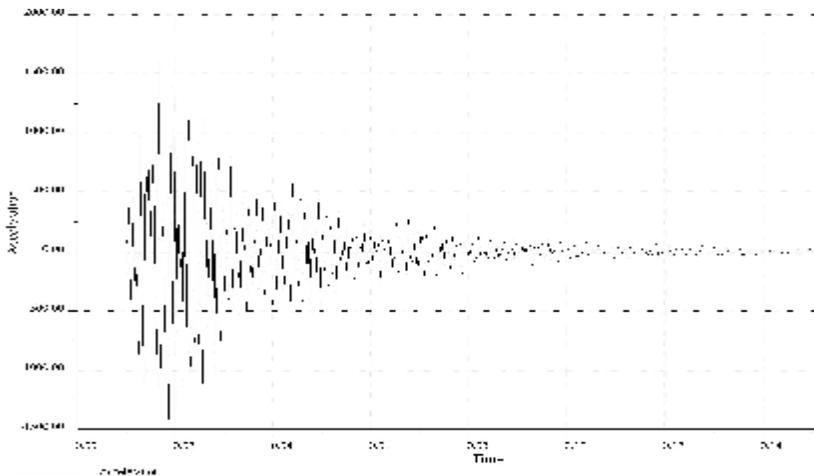


Рис. 21. Ускорения точки 2 при импульсном воздействии

Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований показывает, что наблюдается хорошее качественное и удовлетворительное количественное соответствие собственных форм и частот колебаний макета корпуса БТР-80. Погрешность в определении частот не превышает 10 %. Это свидетельствует в пользу применимости используемых конечно-элементных моделей и пакета Pro/Mechanica к решению задач о динамическом нагружении усилиями отдачи при производстве выстрелов.

В дальнейшем предполагается использовать разработанный программно-модельный комплекс для анализа и синтеза корпусов боевых машин с учетом реакции на нестационарное нагружение.

Список литературы: 1. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541с. 2. *Пелешко Е.В.* Обобщенно-параметрический подход к исследованию корпусов транспортных средств специального назначения. // Вісник НТУ „ХПІ”. Тематичний випуск “Машинознавство та САПР” – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. – № 53. – С.106-111. 3. *Васильев А.Ю., Мартыненко А.В., Шаталов О.Е., Пелешко Е.В.* Комплексный подход к модернизации корпусов легкобронированных машин с использованием современных программных комплексов // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – ТДАА, 2005. – №26. – С.169-174. 4. *Пелешко Е.В.* Применение обобщенно-параметрического подхода к анализу корпусов транспортных средств специального назначения // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. – №1. – С.83-87. 5. *Васильев А.Ю., Пелешко Е.В.* Построение параметрических моделей корпусов многоцелевых транспортеров для расчета их прочностных и жесткостных характеристик // Вестник НТУ “ХПІ”. Тематический выпуск „Колесные и гусеничные машины специального назначения” – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2003. – № 28. – С.102-112.

Поступила в редколлегию 28.10. 2006