

УДК 623.438: 539.3

Ткачук Н.А., Веретенников А.И., Бруль С.Т., Грабовский А.В., Литвиненко А.В.

### УДАРНЫЕ РЕЗОНАНСЫ В БРОНЕКОРПУСАХ ВОЕННЫХ ГУСЕНИЧНЫХ И КОЛЕСНЫХ МАШИН ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ СТРЕЛЬБЫ

**Введение.** При проектировании корпусов боевых бронированных машин учитывается влияние различных нагрузок, в т.ч. реактивных усилий отдачи, возникающих в процессе осуществления выстрелов из штатного вооружения. В то же время для тяжелых боевых машин [1] все возникающие при этом проблемы обеспечения прочности и жесткости разрешались за счет массивности силовых элементов бронекорпуса. Действительно, требования обеспечения необходимого уровня защищенности от действия кинетических и кумулятивных боеприпасов, фугасов и мин приводили к наращиванию толщины гомогенной или комбинированной (композитной) брони во всех проекциях танка. При этом автоматически обеспечивалась прочность и жесткость корпуса, реакция которого к воздействию реактивных усилий отдачи при осуществлении стрельбы из штатного вооружения (например, пушки калибра 125 мм) сводилась в основном к перемещению на элементах подвески с малой упругой деформацией самого корпуса.

В то же время тенденции широкого применения легкобронированных машин привели, во-первых, к использованию корпусов в виде тонкостенных сварных пластинчато-стержневых конструкций. Во-вторых, машины данного типа оснащаются хотя и малокалиберными пушками (до 30 мм), но с высоким темпом стрельбы (до сотен выстрелов в минуту). В результате собственные частоты колебаний бронекорпусов снижаются, а частота возбуждения возрастает. Возникает опасность возникновения резонансных режимов при осуществлении стрельбы. Данный вопрос не исследовался до настоящего времени в литературе. В этой работе ставится цель провести анализ возможных резонансных режимов и определить критерии отстройки от них на этапе проектных расчетов бронекорпусов легкобронированных машин.

**Постановка задачи.** Рассмотрим бронекорпус как динамическую систему, подверженную воздействию серии реактивных усилий, возникающих в процессе стрельбы из штатного вооружения (например, скорострельная малокалиберная пушка). Поведение этой системы описывается в общем виде системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$M\ddot{u} + K\dot{u} + Cu = P(t), \tag{1}$$

где  $M, K, C$  – матрицы масс, демпфирования и жесткостей,  $u(t)$  – обобщенные координаты исследуемой системы,  $P(t)$  – внешнее воздействие.

Уравнения (1) получаются в результате применения к бронекорпусу как континуальной системе процедуры метода конечных элементов [2]. В этом случае в качестве обобщенных координат выступают узловые перемещения и углы поворота (степени свободы конечно-элементной модели).

Вид временного распределения  $P(t)$  в данном случае специфичен и состоит из серии импульсов длительностью  $t$  и с частотой повторения  $\omega$  и периодом между ними  $T$  (рис. 1).

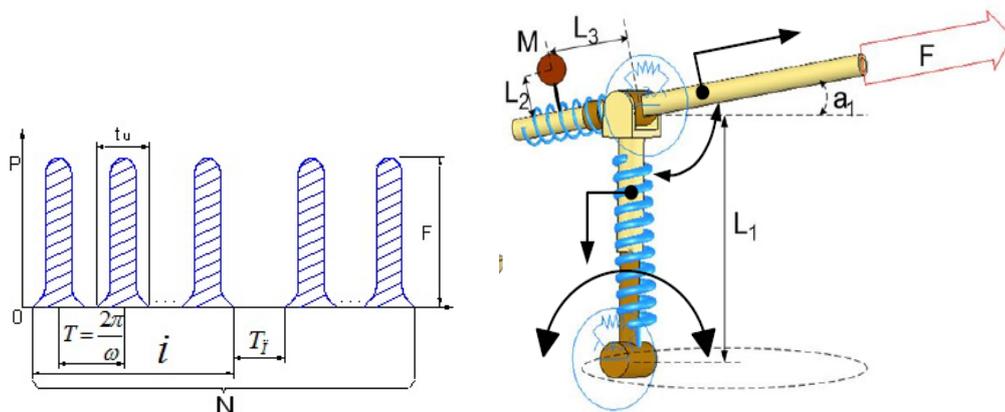


Рисунок 1 – Временное распределение реактивных усилий отдачи на бронекорпус при осуществлении стрельбы из штатных артиллерийских скорострельных систем

Если  $t_u \ll T$ , то имеем дело с единичными выстрелами. Если  $t_u \gg T_C$ , где  $T_C$  – нижняя собственная частота колебаний бронекорпуса, то характер приложения нагрузки – квазистатический. Однако эти соотношения, справедливые для корпусов тяжелых боевых машин, нарушаются для легкобронированных. Характерные времена  $t_u$  и  $T$  при этом находятся в зоне от единиц до десятков миллисекунд. С учетом того, что собственные частоты колебаний корпусов легкобронированных машин намного ниже, чем у тяжелых, то картина тенденций следующая: собственные частоты колебаний при снижении массы боевой бронированной машины имеют тенденцию к снижению, а частоты возбуждающих импульсов нагружения – к возрастанию (рис. 2).

В определенный момент это может привести к реализации окорезонансных режимов. Учитывая, что спектр собственных частот колебаний бронекорпусов, как правило, достаточно густой, то возникает риск расширения опасных зон. В то же время могут обнаружиться другие проблемы. В частности, возникает вопрос о реализации возможного ударного резонанса. Эта задача рассмотрена далее в работе.

**Методика определения условий наступления ударного резонанса в бронекорпусах легкобронированных машин.** Рассмотрим уравнение (1) в случае исчезающе малого демпфирования. Для этой системы собственные частоты колебаний определяются из частотного уравнения

$$\det(C - p^2 M) = 0, \quad (2)$$

где  $p = \{p_1; p_2; p_3 \dots; p_r; \dots\}$  – набор собственных частот, нижняя из которых –  $p_1$  и количество которых определяется количеством степеней свободы исследуемой динамической системы.

Как известно, при неучете трения путем использования нормальных (главных) координат уравнения (2) можно разделить, получив последовательность уравнений

$$m_i \ddot{x}_i + c_i x_i = P(t); \quad p_i^2 = c_i / m_i, \quad (3)$$

где  $x_i$  –  $i$ -я главная координата;  $m_i, c_i$  – диагональные компоненты измененных матриц масс и жесткости, соответствующие собственной частоте  $p_i^2$ ;  $P_i(t)$  – измененная по амплитуде, но неизменная по характеру временного распределения (см. рис. 1) сила, соответствующая возбуждению  $i$ -й формы колебаний.

С другой стороны, правую часть (3) тоже можно разложить, представив в виде ряда Фурье по гармоникам разной кратности от  $\omega$ :

$$P_i(t) = a_i^0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_i^k \cos k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} b_i^k \sin k\omega t. \quad (4)$$

Как известно [3,4], при совпадении какой-либо собственной частоты  $p_i$  с какой-либо гармоникой частоты  $\omega$  может наступить резонансный режим:

$$p_i = k\omega, \quad i = 1, 2, \dots; \quad k = 1, 2, \dots \quad (5)$$

При  $k = 1$  получаем обычный резонанс, а при  $k = 2, 3, \dots$  – ударный [4].

Опасность ударного резонанса усиливается за счет его множественности, т.е. возможности возникновения при гораздо большем количестве вариантов соотношения собственных частот колебаний и частот вынуждающих сил.

При этом нужно заметить, что спектр собственных частот колебаний  $p_i$  зависит от вариантов конструктивного исполнения бронекорпусов, т.е. от способов компоновки бронепанелей, способов их усиления, углов наклона и толщин в различных проекциях. Если обозначить массив этих факторов через  $\chi$ , то частотное уравнение (2) примет вид

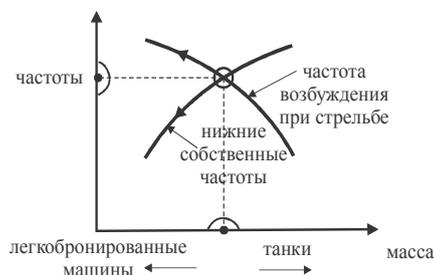


Рисунок 2 – Тенденции изменения нижних собственных частот колебаний и частот возбуждения при производстве выстрелов из штатных систем вооружения боевых бронированных машин

$$\det(C(\chi) - p^2 M(\chi)) = 0. \quad (6)$$

Здесь матрицы жесткости  $C$  и масс  $M$  параметрически зависят от  $\chi = \{\chi_1, \dots, \chi_N\}$ . В силу этого

$$p_i = p_i(\chi). \quad (7)$$

Тогда задачу отстройки от ударных резонансов можно представить в виде:

$$I(\chi) = \sum_{i,k} \gamma_{ik} (p_i(\chi) - k\omega)^2 \rightarrow \max, \quad (8)$$

где суммирование по  $i, k$  проводится для той части спектра частот, который ощутимо возбуждается при действии усилий отдачи в ходе стрельбы очередью;  $\gamma_i$  – некоторые весовые коэффициенты.

Конкретизация правой части выражения (8) требует дополнительной информации о пространственном распределении усилий отдачи, а также о характере и величине демпфирования на той или иной частоте. В то же время структурно функционал  $I$  соответствует мере степени отстройки от ударных резонансов, и чем он больше, тем лучше конструкция бронекорпуса с точки зрения избежания ударных резонансов.

**Примеры применения.** Как уже указывалось, в числе факторов  $\chi_s$ , влияющих на отстройку от резонансных режимов (8), выделяются различные группы. В частности, можно выделить среди них конструктивное исполнение корпуса. Сам этот фактор трудно формализовать, однако конструкторский анализ того или иного бронекорпуса дает возможность четко отделить, например, корпус БТР-80 от корпуса МТ-ЛБ или БТР-3 и т.д. Рассмотрим на первом этапе характерные особенности, накладываемые на собственные частоты колебаний структуры бронекорпуса. Для этого были построены модельные варианты бронекорпусов БТР-80, МТ-ЛБ и БТР-3 с одинаковой толщиной бронепанелей 6 мм для всех машин и всех панелей во всех проекциях. На рис. 3, 4 представлены некоторые собственные частоты и формы колебаний исследованных бронекорпусов.

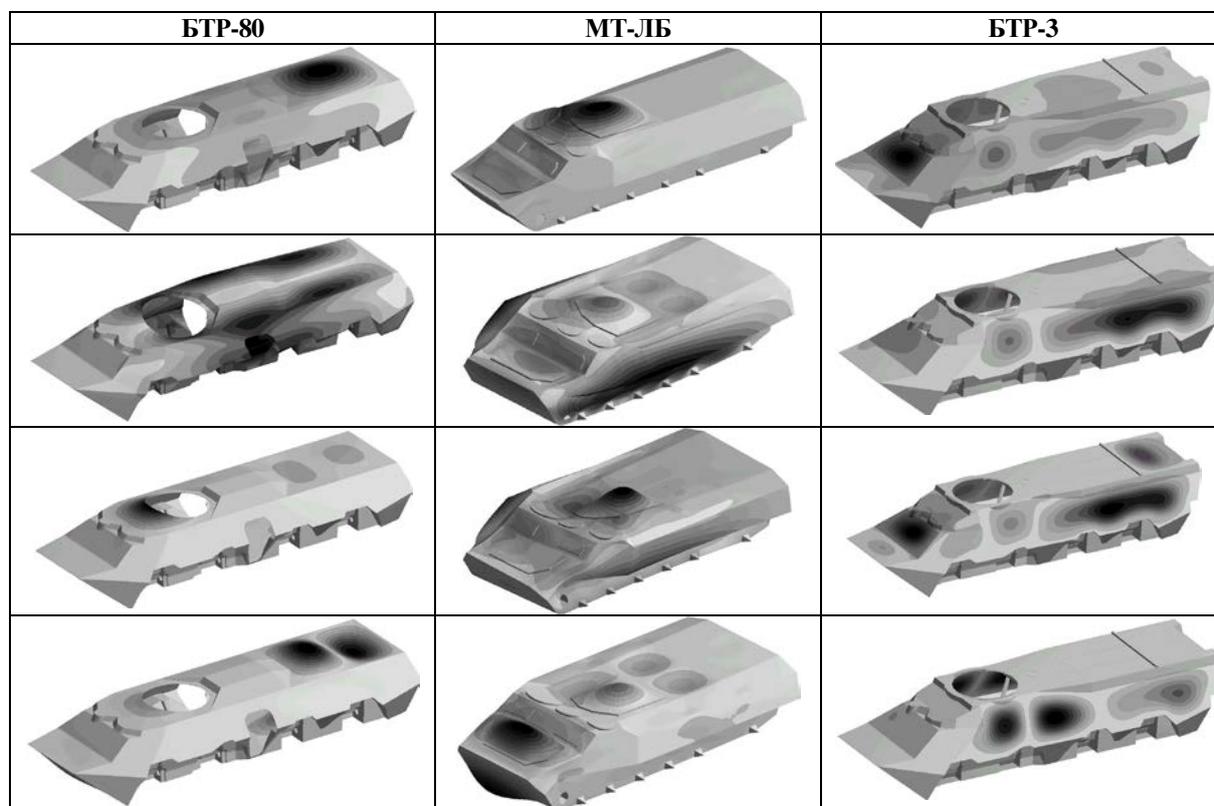


Рисунок 3 – Собственные формы колебаний бронекорпусов БТР-80, МТ-ЛБ, БТР-3

**Анализ представленных результатов** дает основание для выводов:

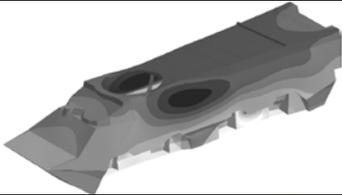
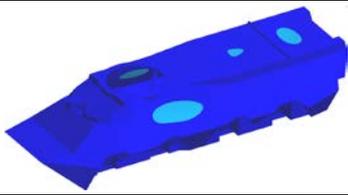
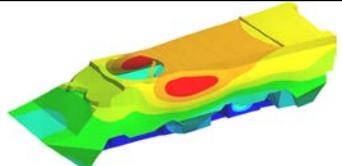
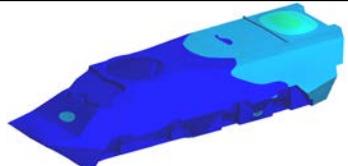
- 1) спектры собственных частот колебаний всех бронекорпусов достаточно густые;
- 2) для некоторых собственных частот опасность попадания в резонансный режим достаточно велика (например, для пушки типа 2А72 частота импульсов отдачи – около 5 Гц, а на рис. 4 отмечены опасные уровни  $5 \pm 0,5$  Гц,  $10 \pm 0,5$  Гц, ...);
- 3) некоторые собственные формы колебаний predisполагают к возникновению ударных резонансов (например, соответствующие преимущественному возбуждению подбашенных листов).

Таким образом, уже первичный анализ даст основание для некоторых выводов, в т.ч. о преимуществе бронекорпуса БТР-3, обладающего лучшим вариантом конструктивного исполнения по сравнению с МТ-ЛБ и БТР-80 по критерию потенциальных возможностей отстройки от резонансных режимов. На втором этапе рассмотрим чувствительность спектра собственных частот колебаний бронекорпуса к варьированию его толщины на примере БТР-3.

В качестве иллюстративного избран базовый вариант номинальных толщин 8 мм для всех элементов бронекорпусов. Варьирование всех толщин осуществляется в пределах  $\pm 20\%$ .

На рис. 5 и в табл. 1 приведены некоторые собственные формы колебаний для номинального и измененных распределений толщин. На рис. 6 – графическая иллюстрация изменения СЧК бронекорпуса при различных степенях его утонения/утолщения по сравнению с базовым вариантом. Видно, что собственные формы колебаний сохраняют свой характер, а частоты изменяются практически линейно в достаточно широком диапазоне варьирования толщин ( $\pm 20\%$ ). Это свидетельствует о том, что если зависимость распределения толщин от каких-то проектно-технологических решений и носит существенно нелинейный характер, то непосредственное влияние степени утонения-утолщения  $\alpha$  элементов бронекорпуса носит характер примерно линейной зависимости.

Таблица 1 – Собственные формы колебаний для номинального (8 мм) распределения толщин и при варьировании толщин панелей корпуса БТР-3

Толщина	Собственная форма колебаний	Толщина	Собственная форма колебаний
<i>1-я собственная частота</i>		<i>2-я собственная частота</i>	
6 мм		6 мм	
7 мм		7 мм	

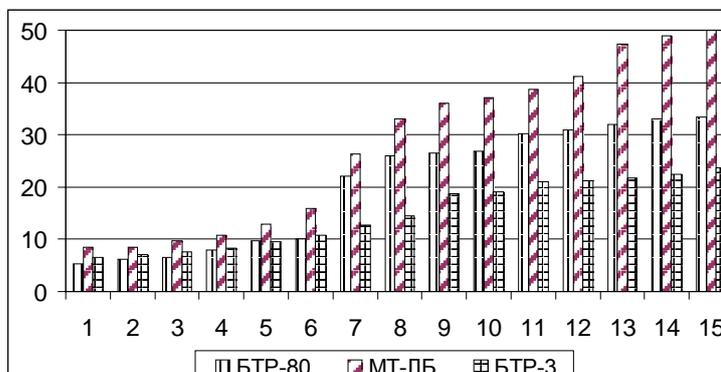
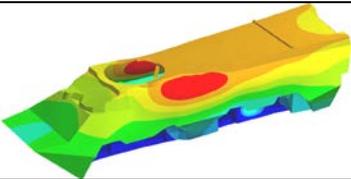
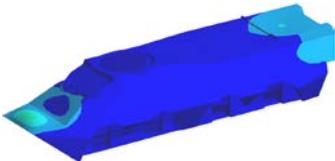
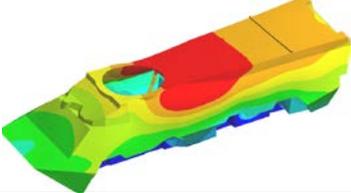
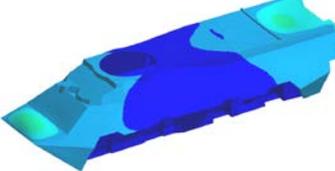
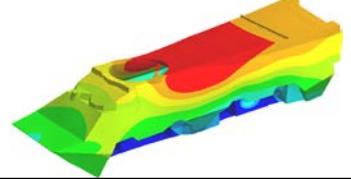
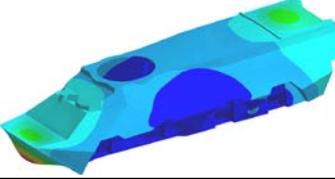
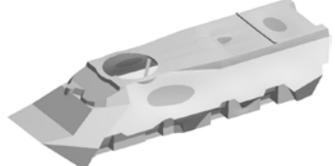
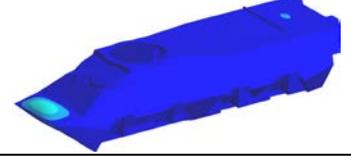
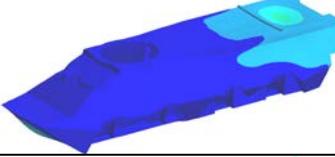
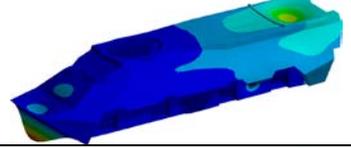
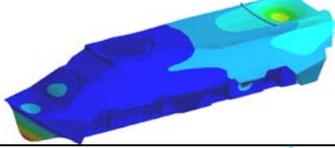
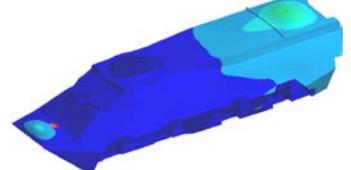
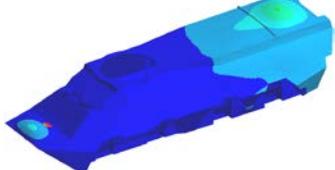
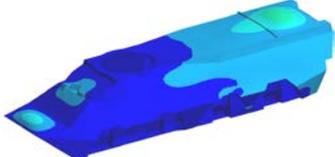
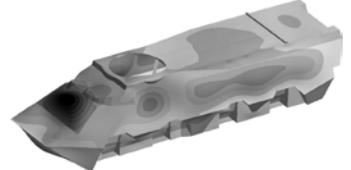
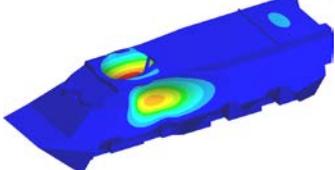


Рисунок 4 – Спектры собственных частот колебаний (Гц) бронекорпусов БТР-80, МТ-ЛБ, БТР-3

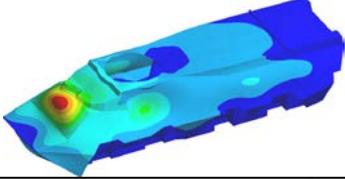
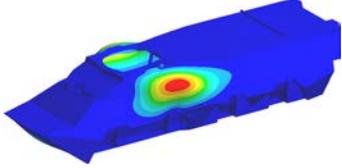
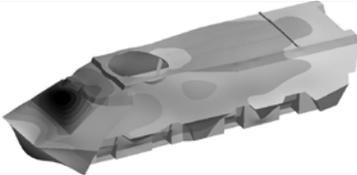
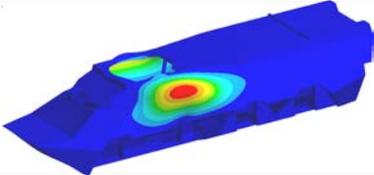
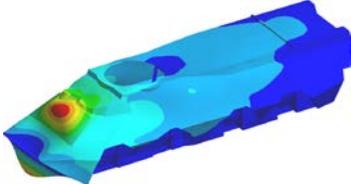
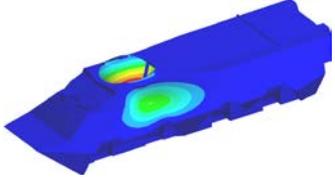
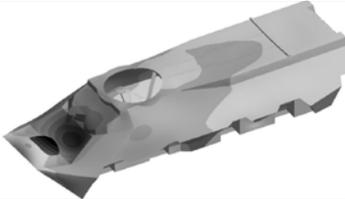
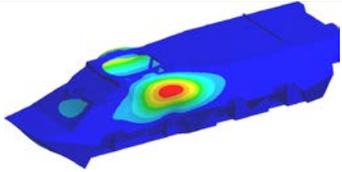
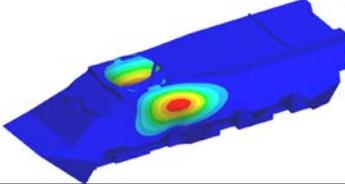
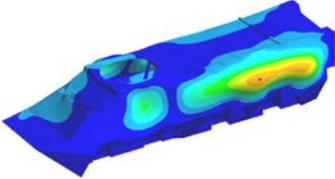
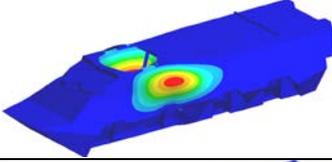
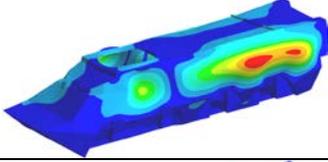
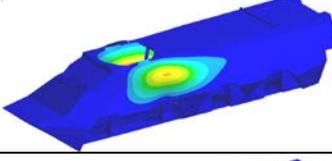
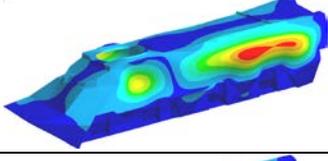
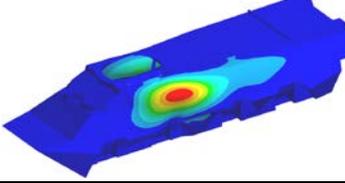
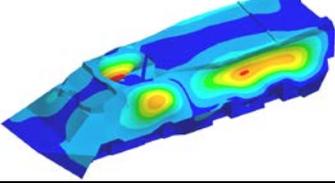
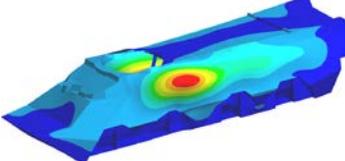
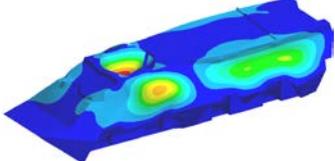
	6	7	8	9	10
	-0,25	-0,125	0	0,125	0,25
1	16,301	17,179	17,953	18,644	19,268
2	20,877	23,669	25,931	27,572	28,797
3	24,841	26,626	28,113	29,395	30,521
4	25,938	27,552	29,369	31,471	33,581
5	26,785	30,769	33,21	35,064	37,044
6	27,158	31,125	34,744	38,564	41,745
7	29,192	31,335	34,967	38,657	42,471
8	29,844	33,645	37,237	40,607	43,876

Рисунок 5 – Карта собственных частот (одинаковый цвет – одна и та же собственная форма) бронекорпуса БТР-3

Продолжение таблицы 1

8 мм		8 мм	
9 мм		9 мм	
10 мм		10 мм	
<i>3-я собственная частота</i>		<i>4-я собственная частота</i>	
6 мм		6 мм	
7 мм		7 мм	
8 мм		8 мм	
9 мм		9 мм	
10 мм		10 мм	
<i>5-я собственная частота</i>		<i>6-я собственная частота</i>	
6 мм		6 мм	

Продолжение таблицы 1

7 мм		7 мм	
8 мм		8 мм	
9 мм		9 мм	
<i>5-я собственная частота</i>		<i>6-я собственная частота</i>	
10 мм		10 мм	
<i>7-я собственная частота</i>		<i>8-я собственная частота</i>	
6 мм		6 мм	
7 мм		7 мм	
8 мм		8 мм	
9 мм		9 мм	
10 мм		10 мм	

Таким образом, модельный пример варьирования толщины панелей бронекорпуса БТР-3 демонстрирует возможность управления спектром его собственных частот колебаний. Отсюда следует и принципиальная возможность решения задачи (8).

**Заключение.** В работе обоснована возможность реализации в бронекорпусах легкобронированных машин обычных и ударных резонансов при осуществлении стрельбы из штатного скорострельного артиллерийского вооружения. Построены разрешающие соотношения для обнаружения возможных резонансных режимов, а также математически формализована задача отстройки от этих режимов путем изменения конструктивного исполнения толщин бронепанелей и свойств материала элементов бронекорпусов. На ряде примеров продемонстрирована возможность управления спектром собственных частот колебаний бронекорпуса за счет варьирования конструкции. Полученные результаты служат основой для реализации в дальнейшем полной оптимизационной постановки задачи синтеза по критерию отстройки от резонансных режимов при проектировании бронекорпусов легкобронированных машин с обеспечением их высоких тактико-технических характеристик.

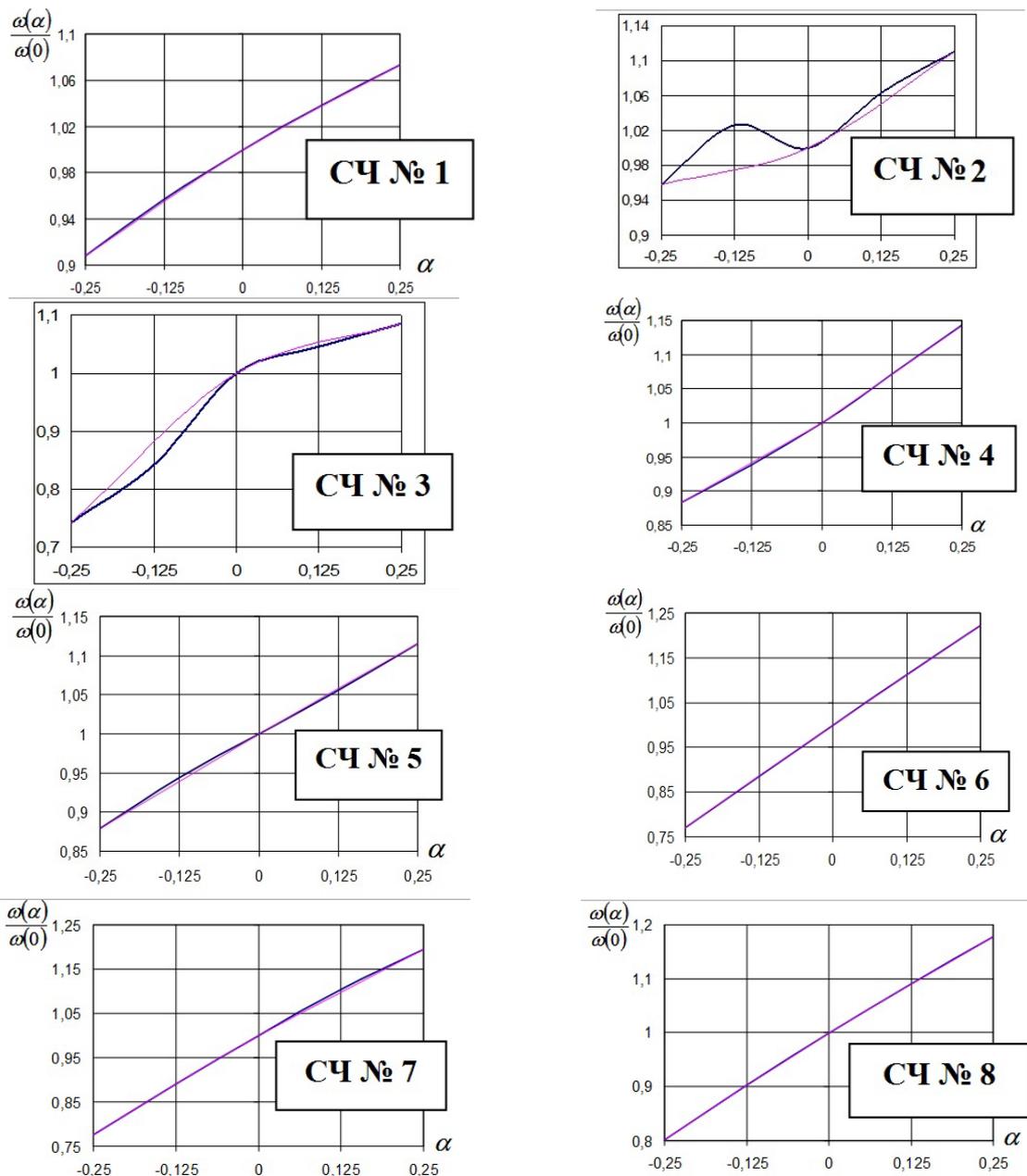


Рисунок 6 – Собственные частоты (СЧ) колебаний бронекорпуса БТР-3, отнесенные к значениям СЧ с базовым значением толщины панелей (8 мм), в зависимости от степени утонения/утолщения этих панелей

Литература

1. Конструкция и расчет танков и БМП. Учебник / В.А. Чобиток, Е.В. Данков, Ю.Н. Брижинеv и др. – М.: Военное издательство, 1984. – 376 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. Бабаков И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Дрофа. – 2004. – 591 с.
4. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний / Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1971. – 240 с.

Bibliography (transliterated)

1. Konstruktsiya i raschet tankov i BMP. Uchebnik. V.A. Chobitok, E.V. Dankov, Yu.N. Brizhinev i dr. – М.: Voennoe izdatelstvo, 1984. – 376 p.
2. Zenkevich O. Metod konechnyih elementov v tehnikе. O. Zenkevich. – М.: Mir, 1975. – 541 p.
3. Babakov I.M. Teoriya kolebaniy, I.M. Babakov. – М.: Drofa. – 2004. – 591 p.
4. Panovko Ya.G. Vvedenie v teoriyu mehanicheskikh kolebaniy. Ya.G. Panovko. – М.: Nauka, 1971. – 240 p.

УДК 623.438: 539.3

Ткачук М.А., Веретенников О.І., Бруль С.Т., Грабовський А.В., Литвиненко О.В.

**УДАРНІ РЕЗОНАНСИ У БРОНЕКОРПУСАХ ВІЙСЬКОВИХ ГУСЕНИЧНИХ  
ТА КОЛІСНИХ МАШИН ПРИ ЗДІЙСНЕННІ СТРІЛЬБИ**

У статті поставлено задачу про вплив циклічних імпульсних навантажень на бронекорпуси легкоброньованих машин як динамічні системи із розподіленими масово-жорсткісними параметрами. Установлені умови настання у таких системах ударних резонансів.

Tkachuk M.A., Veretennikov A.I., Brul S.T., Grabovskiy A.V., Litvinenko A.V.

**SHOCK RESONANCES IN HULLS OF MILITARY CATERPILLAR AND WHEELED VEHICLES IN  
FIRING REALIZATION**

In this paper an effect of cyclic pulse loads on lightly armored vehicles hulls is tasked. These hulls are considered as dynamical systems with distributed mass-rigidity parameters. Conditions for shock resonance onset are established in such systems.