

диальном направлении приводит к высокому уровню растягивающих напряжений в керамике и может быть причиной разрушения мембраны.

**Список литературы:** 1. *Zolochovsky A., Kiihborn A.* Constitutive and numerical modeling of chemical and mechanical phenomena in solid oxide fuel cells and oxygen permeable membranes. // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – Харьков: НТУ “ХПИ”.– 2007.– №23. - С.128-139. 2. *Золочевський О.О.* Дослідження деградації перовскітових керамічних мембран, які базуються на хімічному моделюванні дефектів та на аналізі хімічно наведених напружень // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – Харьков: НТУ “ХПИ”.– 2008.– №2. -С.95 -104. 3. *Пархоменко Л. А.* Диффузионные напряжения в трубчатой мембране реактора для производства синтетического газа. // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – Харьков: НТУ “ХПИ”.– 2009.– №28. -С.78-87. 4. *Zolochovsky A., Parkhomenko L., Kiihborn A.* Analysis of oxygen exchange-limited transport and chemical stresses in perovskite-type hollow fibers. // Materials Chemistry and Physics. – 2012. –Vol. 135. – № 2–3. –PP. 594-603. 5. *Zolochovsky A., Grabovskiy A.V., Parkhomenko L., Lin Y.S.* Coupling effects of oxygen surface exchange kinetics and membrane thickness on chemically induced stresses in perovskite-type membranes. // Solid State Ionics. – 2012. –Vol. 212. – PP. 55–65. 6. *Гончарова Г.В.* Дифузія кисню та хімічно наведені напруження в перовскітоподібних керамічних мембранах. // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – Харьков: НТУ “ХПИ”.– 2008. – № 42. – С. 22-26. 7. *Crank J.* The Mathematics of Diffusion. Second Edition. - Oxford: Oxford University Press, 1975. – 414 p. 8. *Карпслу Г., Езеп Д.* Теплопроводность твердых тел, пер. с англ. – М.: Наука, 1964. – 488 с. 9. *Bouwmeester H.J.M., Burggraaf A.J.* Dense ceramic membranes for oxygen separation // The CRC Handbook of Solid State Electrochemistry, Gellings P.J., Bouwmeester H.J.M. (Eds.). Boca Raton: CRC Press, 1997. – PP. 481-553. 10. *Schlehuber D.* Sauerstofftransport und Degradationsverhalten von Hochtemperaturmembranen für CO<sub>2</sub>-freie Kraftwerke.– Ph.D Thesis, RWTH Aachen. – 2010.

*Поступила в редколлегию 05.02.2013*

УДК 623.438:539.3

**А.Ю. ТАНЧЕНКО**, м. н. с. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ”

## **ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПАНЕЛЕЙ НА СПЕКТР СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

В статье описано исследование влияния изменения толщины панелей на спектр собственных частот колебаний корпусов транспортных средств специального назначения.

**Ключевые слова:** транспортные средства специального назначения, эксплуатационная нагрузка, спектр собственных частот, форма колебаний

У статті описано дослідження впливу зміни товщини панелей на спектр власних частот коливань корпусів транспортних засобів спеціального призначення.

**Ключові слова:** транспортні засоби спеціального призначення, експлуатаційне навантаження, спектр власних частот, форма коливань

In the paper it's described the research of influence of panels thickness change on the spectrum of vibrations eigenfrequencies of special setting transport vehicles hulls.

**Keywords:** special setting transport vehicles, exploitation loading, spectrum of eigenfrequencies,

© А.Ю. Танченко, 2013

vibration form

**Введение.** Шасси многих транспортных средств специального назначения могут быть использованы не только для создания боевых машин, но и машин, предназначенных для выполнения ряда других миссий. При этом на их шасси в зависимости от предназначения могут устанавливаться различные специализированные модули, установки, системы, оборудование. Так, например, хорошо известный многоцелевой транспортер легкий (МТ-Л и МТ-ЛБ) выпускался в широком спектре различных модификаций, а также лег в основу создания объектов гражданского профиля, в частности, ХТЗ-3Н – транспортная гусеничная снегоболотоходная машина, ТГМ-126 – гусеничный транспортер-тягач, а также различные вариации специализированных средств пожаротушения (рис. 1).



Рисунок 1 – Гражданские модификации МТ-ЛБ:  
а - вездеход ТГМ-126 , б - снегоболотоход ХТЗ-3Н, в - гусеничная пожарная машина МТ-ЛБу-ГПМ, г – пожарный вариант МТ-ЛБ

При таком подходе (модификации существующего образца техники) возникает ряд проблем, аналогичных возникающим при проектировании машины «с нуля», поскольку вносимые изменения могут существенно повлиять на характер напряженно-деформированного состояния (НДС) корпуса и его динамические характеристики, в первую очередь - спектр собственных частот колебаний. Так, если взять за основу нормативные толщины элементов корпуса и силовой структуры машины и на их основе внести некоторую коррекцию (это может быть связано как с облегчением/усилением отдельных зон, узлов, так и с некоторым (зачастую допустимым) расхождением на значения толщин при изготовлении по сравнению с номинальными – «чертежными» толщинами), то спектр собственных частот колебаний изменится. Произойдет как бы «миграция» собственных частот, при этом не исключено некоторое изменение собственных форм, им отвечающих, а также номеров этих частот в спектрах.

Учитывая, что при изменении назначения той или иной модификации машины изменяется также спектр и амплитуды действующих эксплуатационных нагруз-

зок, становится ясно, почему так важно знать и характер миграции собственных частот колебаний корпуса как основного интегрирующего элемента транспортного средства специального назначения, и степень их отклонения от исходных величин, определенных для некоторого номинального варианта, принятого за основу. Этот вопрос исследуется в данной статье на примере варианта корпуса МТ-ЛБ, повторяющего по форме и размерам натурный образец, но с условно принятым одинаковым набором толщин всех панелей и внутренней силовой структуры.



а б

Рисунок 2 – Модель корпуса МТ-ЛБ:

а - оболочечная модель, б – внутренняя силовая структура

**Постановка задачи.**

В случае проводимых исследований, в частности, представляет наибольший интерес применимость линейной интерполяции для описания миграции собственных частот при утонении–утолщении стенок панелей корпуса и элементов внутренней силовой структуры.

Проиллюстрируем результаты анализа на примере корпуса тягача серии МТ-ЛБ. На рис. 2 представлена его оболочечная модель с внутренней силовой структурой, конечно-элементная разбивка (рис. 3) и места закрепления



Рисунок 3 – Конечно-элементная модель (~33 000 КЭ)



Рисунок 4 – Моделирование граничных условий опирания





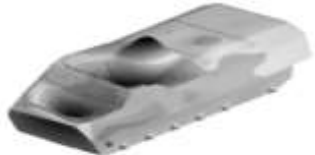





(рис. 4). В качестве условного закрепления была выбрана жесткая заделка 12 зон, которые приходятся на элементы усиления и соответствуют областям расположения катков, чтобы исключить частоты и формы колебаний корпуса как жесткого тела на упругих опорах.

**Результаты расчета.** Проанализируем поведение собственных частот и форм. Рассмотрим случай варьирования значениями толщин в довольно широких пределах:  $6 \pm 2$  мм (одновременно изменяются значения толщин как внешних листов, так и профилей внутреннего усиления). Таким образом, относительное варьирование толщинами составит  $\pm 33\%$  относительно базового варианта (6 мм). Необходимо заметить, что коль скоро речь идет о демон-

страционной задаче, то распределение толщин панелей в проекциях и профилей элементов внутренней силовой структуры не соответствуют реальным конструктивным параметрам.

В ходе численных экспериментов при варьировании толщины элементов корпуса были получены ряд собственных частот и соответствующих им форм собственных колебаний – табл. 1, 2. Видно, что спектр частот довольно густой, и в нем присутствуют как локальные, так и сложные глобальные формы колебаний. Далее проанализирована миграция собственных частот, сопоставимых схожим формам колебаний (см. табл. 2). Как видно, в ряде случаев произошло изменение номера собственной частоты, соответствующей той или иной форме.









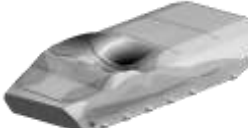









Таблица 1 – Собственные формы колебаний корпуса МТ-ЛБ  
(при толщинах элементов корпуса 6 мм)

частота	формы колебаний	частота	формы колебаний
1 (24.9 Гц)		2 (34.9 Гц)	
3 (35.9 Гц)		4 (38.2 Гц)	
5 (42.5 Гц)		6 (43.9 Гц)	
7 (46.4 Гц)		8 (48.1 Гц)	
9 (51.2 Гц)		10 (51.7 Гц)	

Были получены следующие результаты: при варьировании толщинами сте-

нок элементов корпуса в диапазоне  $6 \pm 2$  мм отклонение значения соответствующих собственных частот составило порядка 20-30% в сторону снижения при уменьшении толщины элементов корпуса, в сторону увеличения – при утолщении. Результаты в графической форме представлены на рис. 5 и в табл. 3. Так, на рис. 5 видно как абсолютное изменение собственных частот, так и относительное (относительно базового варианта для толщин 6 мм).

Таблица 2 – Сопоставление собственных форм колебаний корпуса МТЛБ при изменении составляющих его толщин (числами обозначены порядковый номер собственной частоты, в скобках приведено значение соответствующей собственной частоты)

Толщина		
4мм	6мм	8мм
 1 (19,0 Гц)	 1 (24,9 Гц)	 (29,4 Гц) 1
 2 (25 Гц)	 3 (36 Гц)	 3 (44 Гц)
 3 (28 Гц)	 4 (38 Гц)	 4 (45 Гц)
 4 (29 Гц)	 6 (44 Гц)	 6 (51 Гц)
 6 (34 Гц)	 8 (48 Гц)	 8 (57 Гц)
		

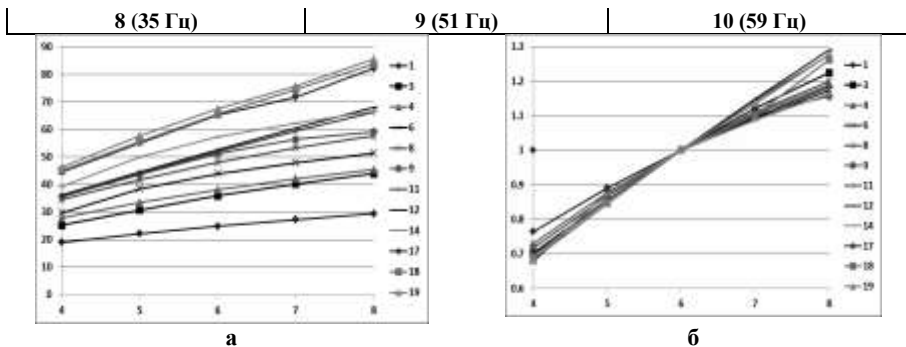


Рисунок 5 – Миграция отдельных собственных частот корпуса МТ-ЛБ при изменении толщины листов, мм: *а* – абсолютные значения, Гц; *б* – относительные (по сравнению с частотами для базового варианта 6 мм) (номера соответствуют порядковым номерам собственных частот для случая 6 мм)

Сразу обращает на себя внимание примерная линейность характера изменения собственных частот. Проанализируем данную особенность более подробно возволяет визуальный ряд: в табл. 3 представлены результаты для некоторых отдельных частот и форм колебаний.

Таким образом, если необходимо рассчитать спектр собственных частот при некотором промежуточном варианте степеней утонения (уменьшение толщины стенок), то это можно сделать в первом приближении путем линейной интерполяции значений частот между их значениями, полученными для кратных (максимальных, базовых и минимальных) степеней изменения толщин. При этом из приведенных картин видно, что качественный вид формы колебаний остается неизменен (для большинства из рассмотренных форм). Однако следует заметить, что не все формы колебаний остаются неизменными при варьировании толщинами в таких широких пределах, в то же время для тех форм, которые удалось сопоставить друг другу, наблюдалась преобладающая примерная линейность поведения значения собственной частоты при утонении/утолщении элементов.

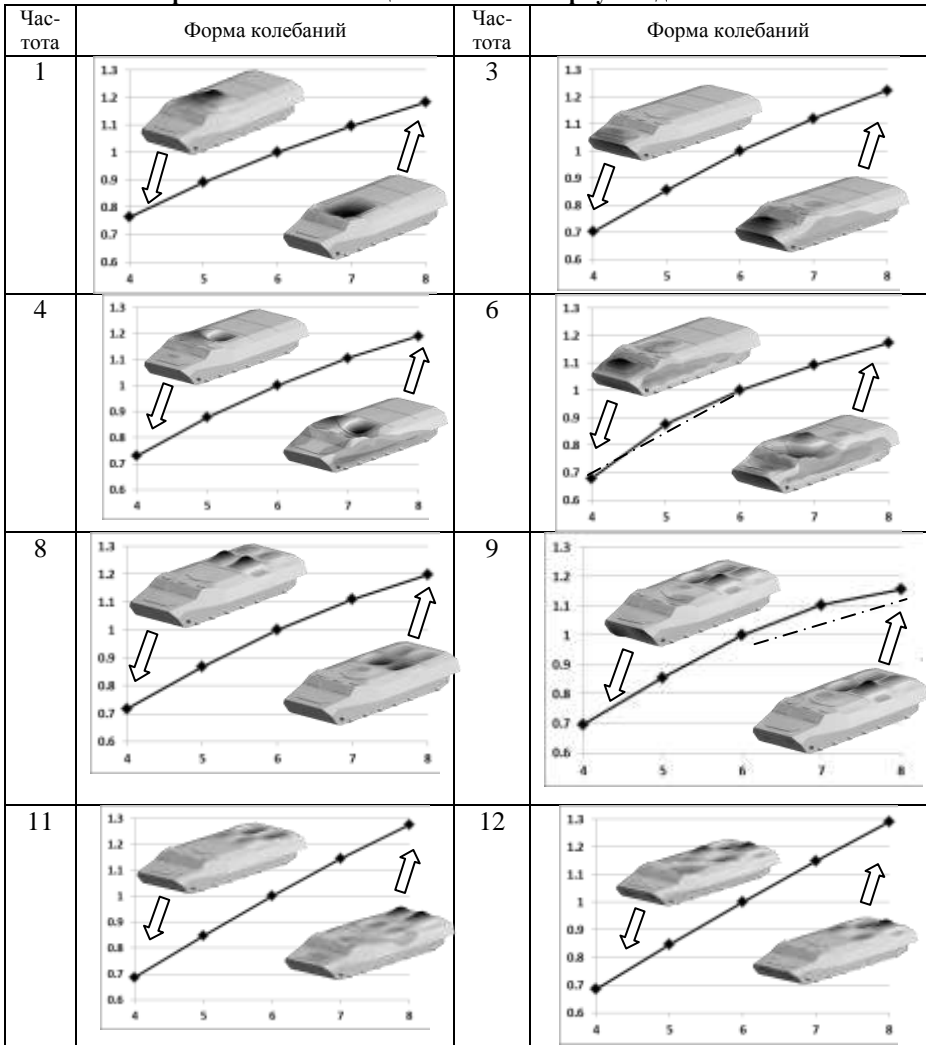
Особое внимание обращает на себя не столько сама линейность поведения, сколько приближительная линейность поведения в столь широких пределах изменения толщин, о чем ярко свидетельствуют данные в табл. 3.

Таким образом, ранее предложенный способ [1] линеаризации описания поведения изменения решения на основе набора «реперных» решений демонстрирует свою применимость и для таких объектов как корпуса транспортных средств специального назначения. В данном случае в качестве набора «реперных» решений могут выступать результаты для крайних положений (т.е. толщин 4 мм и 8 мм) плюс начальный «базовый» вариант (6 мм).

Следовательно, на первых этапах проектирования/модернизации той или иной машины все промежуточные рассматриваемые варианты конструктивных решений с набором толщин между «реперными» будут характеризоваться соб-

ственными частотами, лежащими между крайними значениями, полученными для этих реперных вариантов примерно на соответствующих отрезках (в нашем случае значения толщин между 4 мм и 8 мм).

Таблица 3 – Изменение собственной частоты и соответствующей ей формы колебаний при изменении толщин элементов корпуса в диапазоне  $6 \pm 2$  мм



Тут же необходимо отметить, что и принятое в статье распределение толщин, и характер их варьирования (и те, и другие – одинаковые по всем элементам) являются

условными, модельными. В реальности все панели имеют различную толщину и степень ее варьирования. В результате приходим к изучению закономерностей изменения частот как функции не одной, а многих переменных. При этом, однако, тенденции изменения исследуемых величин сохраняются.

Естественно, что предложенный подход никоим образом не отрицает необходимости дополнительного (проверочного) исследования при принятии того или иного проектного решения, однако это исследование будет уже приближением более высокого порядка. Предложенная методика эффективна на начальных этапах проектирования, когда нужно из множества предлагаемых вариантов выбрать более рациональный, отталкиваясь от него при дальнейших проектных исследованиях.

**Заключение.** Из приведенных результатов видно, что примерная линейность в поведении отдельных частот спектра собственных частот колебаний при варьировании толщины элементов бронекорпуса (в табл. 3 – штрих-пунктирные линии) соблюдается с высокой точностью (отклонение – не больше  $\pm 5\%$  от точного численного решения методом конечных элементов).

Кроме того, необходимо также отметить, что при рассмотрении различных вариантов проектных решений в ходе создания или модернизации корпусов транспортных средств специального назначения [2] и распределение толщин отдельных элементов базового варианта конструкции, и диапазоны их потенциального варьирования чрезвычайно пестры по локализации в различных зонах и проекциях машины. Соответственно, вместо одного параметра присутствует целый их массив. В таком случае собственные частоты, соответствующие различным собственным формам колебаний, по-разному будут реагировать на изменение отдельных компонент множества толщин различных элементов корпуса. Таким образом, задача анализа отклика существенно усложнится. В то же время близкий к линейному характер этого отклика по отдельным толщинам или по их совокупностям с той или иной точностью сохранится [1]. В свою очередь это – достаточно важная дополнительная информация, которая во многих случаях может значительно ускорить проведение проектных исследований и принятие на их основе обоснованных решений.

В дальнейшем планируется применить предложенный в статье подход к исследованию изменения собственных частот корпусов транспортных средств специального назначения с реальными наборами толщин в различных проекциях машин и по различным панелям, а также элементам усиления.

**Список литературы:** 1. Анализ чувствительности прочностных и динамических характеристик машиностроительных конструкций на основе прямого возмущения конечно-элементных моделей / *Ткачук Н.А., Танченко А.Ю., Ткачук А.Н., Чурбанов П.В., Храпцова И.Я., Ищенко О.А.* // Вісник НТУ «ХПІ». Тем.вип.: Машинознавство та САПР. – 2012. – №22. – С. 147-169. 2. Математическое и численное моделирование динамических процессов в элементах легкобронированных боевых машин / *Б.А. Мельник, А.Н. Малакей, Д.С. Мухин, А.Ю. Танченко, О.В. Кохановская* // Вісник НТУ «ХПІ». Тем.вип.: Машинознавство та САПР. – 2013. – № 1. – С. 93-117.

*Надійшло до редколегії 12.04.13*