

А. В. ЛИТВИНЕНКО, канд. техн. наук, соискатель НТУ «ХПИ»

ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРПУСОВ

Проектные исследования корпусов легкобронированных машин служат в качестве необходимых и важных этапов анализа зависимости их прочностных, жесткостных и динамических характеристик от тех или иных варьируемых параметров. Это делается с целью обоснования таких значений этих параметров, которые обеспечат требуемые тактико-технические характеристики проектируемых машин. Статья содержит результаты численно-аналитического исследования прочностных, жесткостных и динамических характеристик корпусов легкобронированных машин. На примере корпуса бронетранспортера БТР-3Е продемонстрирована применимость линеаризации отклика этих характеристик на варьирование параметров бронекорпусов. Приведены иллюстрации изменения собственных частот и форм колебаний корпуса.

Ключевые слова: тактико-технические характеристики, легкобронированная машина, прочностные характеристики, чувствительность, собственные формы колебаний, варьируемый параметр, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, расчетно-аналитический метод.

Введение. Проектные исследования корпусов легкобронированных машин служат в качестве необходимых и важных этапов анализа зависимости их прочностных, жесткостных и динамических характеристик от тех или иных варьируемых параметров. Это делается с целью обоснования таких значений этих параметров, которые обеспечат требуемые тактико-технические характеристики проектируемых машин (защищенности, подвижности, огневой мощи). Традиционным способом при этом является применение метода конечных элементов (МКЭ) [1] в соответствии с тем или иным способом перебора вариантов проектных решений [2, 3]. В то же время такой подход несет на себе все недостатки численного моделирования, в том числе – трудность установления зависимостей интересующих характеристик от тех или иных варьируемых параметров. Такая возможность является как раз преимуществом аналитических методов расчета. Однако они неприменимы для расчета таких сложных конструкций как, например, бронекорпуса боевых легкобронированных машин.

Для устранения отмеченных недостатков двух альтернативных методов исследования предлагается разработать расчетно-аналитический метод анализа прочностных, жесткостных и динамических характеристик сложных механических систем от их проектно-технических параметров. Эта задача составляет цель данной статьи.

Анализ публикаций по теме. Методологической основой предполагаемого к разработке метода является технология обобщенного параметрического описания сложных и сверхсложных механических систем, предложенная в работах [4,5]. В развитие данного подхода в статье [6] предложена методология анализа влияния варьирования отдельных параметров на ряд характеристик на примере корпусов легкобронированных машин. Схожие подходы были использованы в работе [7] применительно к процессу утонения тонкостенных машиностроительных конструкций.

Таким образом, определенная методологическая база для решения поставленной задачи подготовлена. Требуется только ее математическая формализация и реализация в виде соответствующего программно-модельного обеспечения. Это – **цель** данной работы.

Постановка задачи. Исследуется тонкостенная пространственная конструкция, ярким примером которой может быть корпус бронетранспортера (рис. 1).

Для нее могут быть поставлены различные типы задач моделирования физико-математических процессов или состояний. В частности, представляет интерес анализ напряженно-деформированного состояния [8] или малых колебаний бронекорпуса под действием тех или иных нагрузок [9].

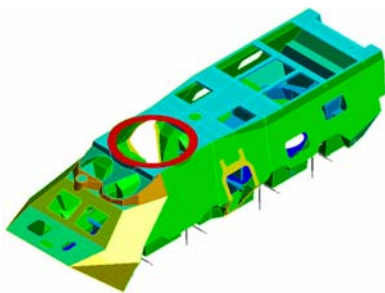


Рис. 1 — Корпус бронетранспортера БТР-3Е с пробным набором толщин всех панелей 6 мм

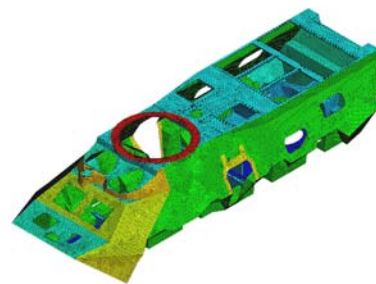


Рис. 2 – Конечно-элементная модель

Материалы исследований. Применительно к таким сложным конструкциям как бронекорпуса легкобронированных машин обычно используются численные методы решения данных задач. Так, задача определения напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов в квазистатической постановке сводится к решению систем линейных алгебраических уравнений [1]:

$$K \cdot x = f, \quad (1)$$

где K – матрица жесткости конечно-элементного ансамбля, моделирующего объект исследований; x – вектор узловых неизвестных; f – вектор узловых нагрузок.

Задача определения собственных частот колебаний предполагает решение задачи на собственные значения. Частотное уравнение –

$$\text{Det}(K - \omega^2 M) = 0, \quad (2)$$

где M – матрица масс конечно-элементной модели исследуемого объекта, ω – собственная частота колебаний (начиная с низшей ω_1 и далее $\omega_{i+1} \geq \omega_i$, $i=1,2,\dots$).

Ставится задача установления возмущенных решений задач (1) и (2). Возмущение вносится путем варьирования параметров $p = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}^T$, совокупность которых описывает конструктивно-технологическое решение, например, корпуса бронетранспортера (см. рис. 1). Тогда, следуя работе [10], можно формально записать возмущенные решения (1), (2) в виде:

$$x \approx x_0 + \Delta_1 \cdot \Delta p; \quad (3) \quad \omega_i^2 = \omega_{i0}^2 + \Delta_2 \cdot \Delta p, \quad (4)$$

где решения с индексом «0» соответствуют некоторому базовому набору параметров исследуемого объекта P_{s0} , а матрицы Δ_1 и Δ_2 содержат компоненты чувствительности решений к изменению параметров. Таким образом, возмущенное решение линейно зависит от приращения параметров Δp .

Приближенные равенства (3), (4) обращаются в точные для бесконечно малых приращений параметра. При конечном же их приращении получаем погрешность, увеличивающуюся с ростом Δp , что снижает применимость данных соотношений. Для устранения этого недостатка предлагается определять компоненты чувствительности путем конечного возмущения конечно-элементной модели при всех нулевых Δp_i , кроме некоторого одного $\Delta p_k = \Delta_k^*$. Здесь Δ_k^* – некоторое характерное значение для варьирования параметров, определяемое практикой и обычно находящееся в диапазоне $(0,1 \div 0,3) \cdot p_{k0}$. Тогда, обозначая такой массив параметров \tilde{p}_{ki} , получаем приближенные соотношения для коэффициентов матриц чувствительности:

$$D_{1ij} = [x_i(\tilde{p}_{ij}) - x_{0i}] / \Delta_j; \quad (5) \quad D_{2ij} = [\omega_i^2(\tilde{p}_{ij}) - \omega_{0i}^2] / \Delta_j. \quad (6)$$

Решения $x(\tilde{p}_j)$, $\omega_i^2(\tilde{p}_j)$ можно назвать «реперными», поскольку они служат базой для конечно-разностного представления характеристик чувствительности.

Предложенный способ вычисления характеристик чувствительности в корне отличен от предлагаемого в теории возмущений. Его несомненным преимуществом является сохранение точности на конечном интервале варьирования каждого параметра Δp_k или их совокупности. В этом состоит еще большее преимущество: соотношения (3), (4) с коэффициентами (5), (6) приводят критериальные прочностные, жесткостные и динамические характеристики к линейному виду по отношению к степени варьирования

параметров p . Этим самым обосновывается применимость при решении задач синтеза проектно-технологических параметров средств и методов линейного программирования [10-12]. Таким образом, резко возрастает оперативность решения данных задач при сохранении приемлемой точности результатов.

Численный пример. Исследуется бронекорпус БТР-3Е (см. рис. 1). В качестве произвольного условного начального набора толщин всех его панелей принята толщина 8 мм. Материал – сталь 45 (условно). Модуль упругости и коэффициент Пуассона, а также плотность материала – из справочной библиотеки ANSYS. Конечно-элементная модель объекта – на рисунке 2. На рисунках 3-7 – результаты расчетов.

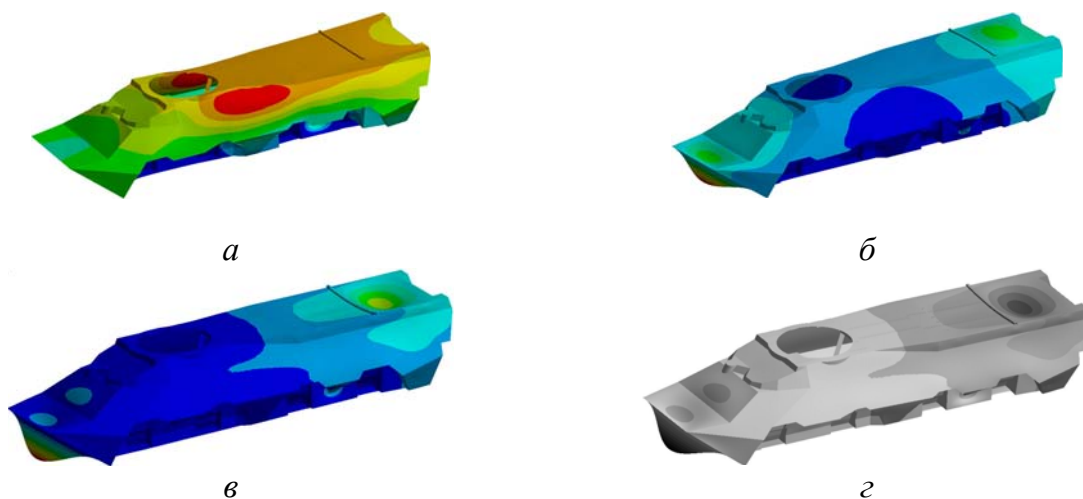


Рис. 3 – Формы колебаний бронекорпуса БТР-3Е: a – №1; b – №2; v – №3; z – №4.

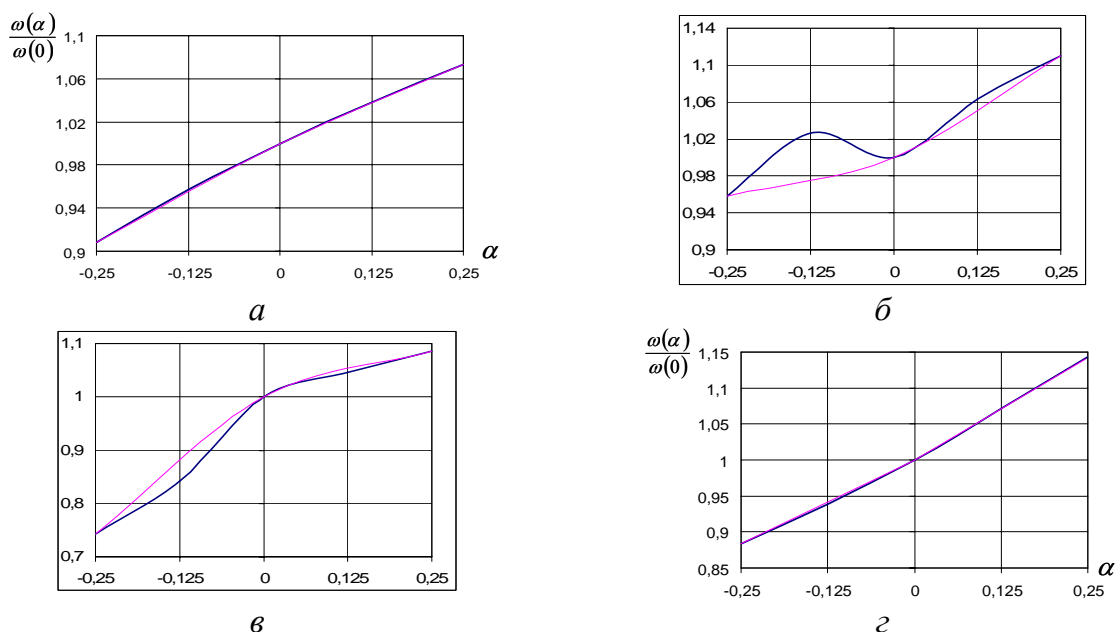


Рис. 4 – Зависимости частот колебаний бронекорпуса БТР-3Е от параметра α :
 a – №1; b – №2; v – №3; z – №4.

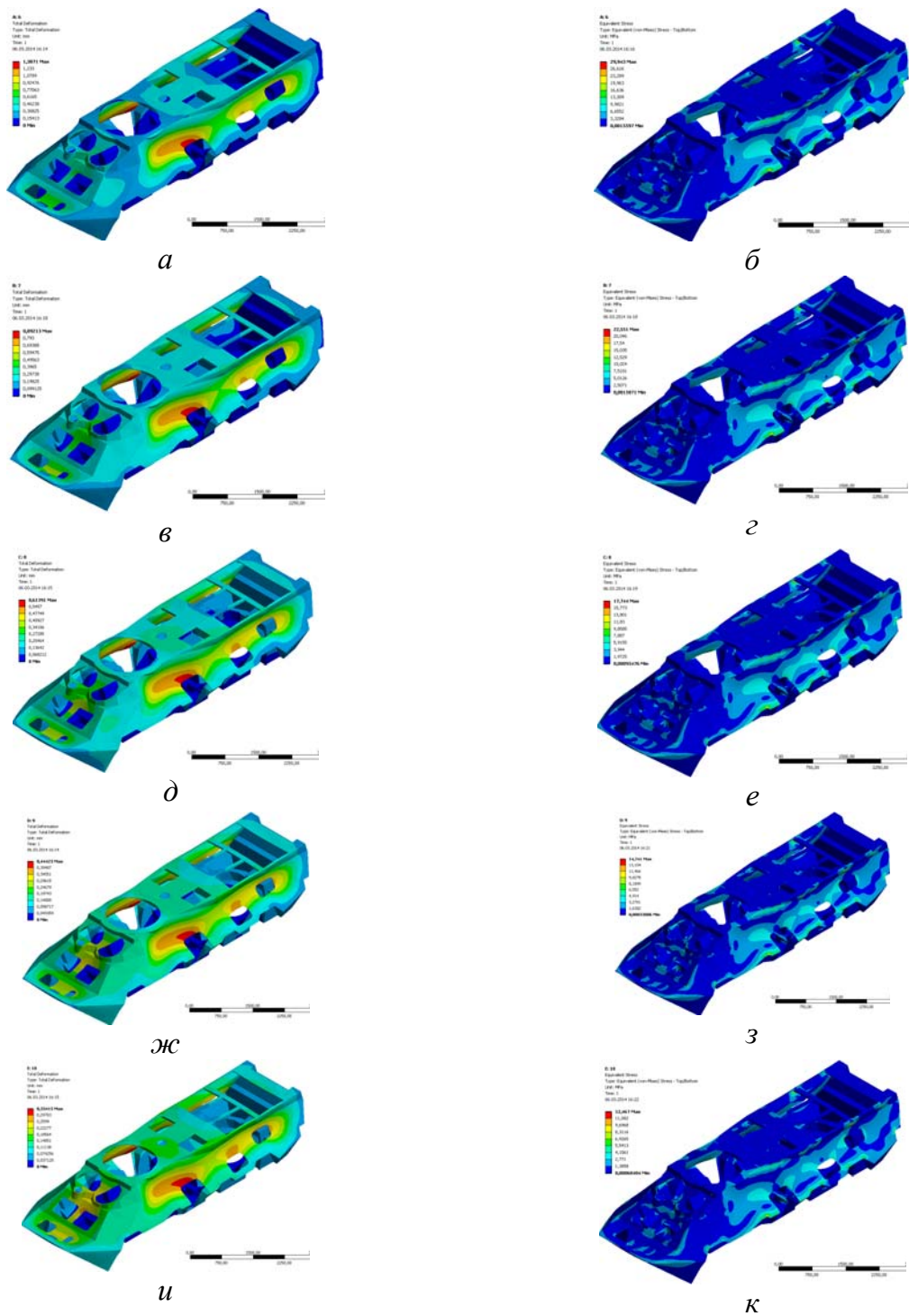


Рис. 5 – Распределение полных перемещений и эквивалентных напряжений по Мизесу в бронекорпусе БТР-3Е: а, б – толщина листов 6 мм; в, г – толщина листов 7 мм; д, е – толщина листов 8 мм; ж, з – толщина листов 9 мм; и, к – толщина листов 10 мм; а, в, д, ж, и – полные перемещения; б, г, е, з, к – напряжения по Мизесу.

Варьируется толщина панелей боковой проекции корпуса. Величина варьирования – $\pm 25\%$ в сторону утолщения и утонения (т.е. $\alpha \in [-0,25; 0,25]$).

На рисунке 3 представлены отдельные формы колебаний корпуса БТР-3Е, а на рисунке 4 – зависимости некоторых собственных частот колебаний от степени утонения/утолщения боковых панелей бронекорпусов. Важно, что на конкретном примере подтверждается спрогнозированная ранее тенденция, близкая к линейной зависимости по каждому параметру.

На рисунке 5 – напряженно-деформированное состояние бронекорпуса при действии избыточного внешнего давления, имитирующего воздействие ударной волны.

Далее на рисунках 6, 7 – зависимости максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу и максимальных прогибов корпуса от степеней утолщения/утонения боковых панелей бронекорпуса.

Видно, что прогнозированное примерно линейное поведение прочностных и жесткостных характеристик бронекорпусов от варьирования отдельных толщин панелей подтверждается. Отклонение аппроксимационной поверхности отклика от точной не превышает $3\div 5\%$.

Важно, что на конкретном примере подтверждается спрогнозированная ранее тенденция не только по динамическим, но и по прочностным характеристикам.

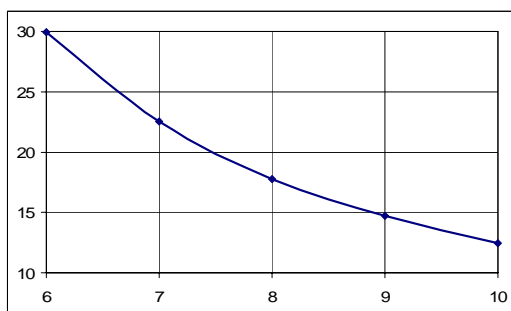


Рис. 6 – Зависимость максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу (МПа) от степеней утолщения/утонения боковых панелей бронекорпуса

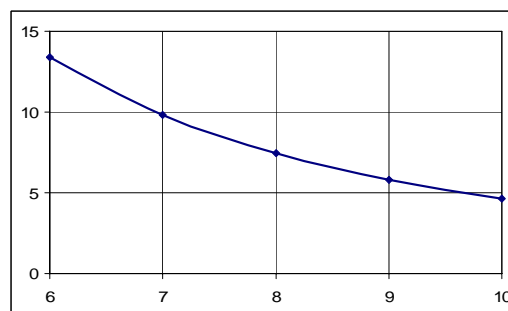


Рис. 7 – Зависимость максимальных прогибов корпуса от степеней утолщения/утонения боковых панелей бронекорпуса

Выводы. Описанная в работе методология обоснования проектно-технологических параметров на основе расчетно-аналитического моделирования реакции сложных механических систем на изменение различных параметров продемонстрировала свою применимость, точность и преимущества перед традиционными подходами.

Получаемые с ее помощью линейаризованные аппроксимационные функции отклика дают возможность оперативного решения задач синтеза параметров бронекорпусов проектируемых легкобронированных машин по прочностным, жесткостным и динамическим критериям, что напрямую связано с обеспечением заданных тактико-технических характеристик, например, защищенности.

В дальнейшем предложенная разработка планируется к использованию в практике проектных исследований ряда корпусов проектируемых легкобронированных машин.

Список литературы: 1. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике / *О. Зенкевич.* – М.: Мир, 1975. – 541 с. 2. *Бруль С. Т.* Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты / *С. Т. Бруль, Н. А. Ткачук, А. Ю. Васильев, И. Н. Карапейчик* // *Механіка та машинобудування.* – 2011. – №1. – С. 66–73. 3. *Карапейчик И. Н.* Расширенная расчетно-экспериментальная идентификация параметров численных моделей корпусных элементов транспортных средств специального назначения / *И. Н. Карапейчик, А. В. Литвиненко, С. Т. Бруль, Н. А. Ткачук, А. Ю. Васильев* // *Вісник НТУ «ХПІ».* Зб. наук. праць. Тем.вип.: Машинознавство та САПР. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 22. – С. 69-77. 4. *Ткачук Н. А.* Параметрические модели элементов сложных систем как основа построения специализированных расчетных схем / *Н. А. Ткачук, Ю. В. Веретельник, Ю. Я. Миргородский, Е. В. Пелешко* // *Механіка та машинобудування.* – Харків: НТУ „ХПІ”, 2004.– № 2, т. 2. – С.79-84. 5. *Ткачук Н. А.* Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / *Н. А. Ткачук, Г. Д. Гриценко, А. Д. Чепурной, Е. А. Орлов, Н. Н. Ткачук* // *Механіка та машинобудування* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – №1. – С. 57-79. 6. *Ткачук Н. А.* Чувствительность прочностных и жесткостных характеристик тонкостенных элементов машиностроительных конструкций к неравномерному изменению толщины / *Н. А. Ткачук, А. В. Литвиненко, А. В. Ткачук, А. В. Грабовский* // *Вісник СевНТУ. Збірник наукових праць.* Випуск 137/2013. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – 2013. – С.187-191. 7. *Танченко А. Ю.* Влияние толщины панелей на спектр собственных частот колебаний корпусов транспортных средств специального назначения / *А. Ю. Танченко* // *Вісник НТУ «ХПІ».* Зб. наук. праць. Серія: Машинознавство та САПР. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – №23 (996). – С. 138-145. 8. *Васидзу К.* Вариационные методы в теории упругости и пластичности: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 542 с. 9. *Бабаков И. М.* Теория колебаний / *И. М. Бабаков.* – М.: Дрофа. – 2004. – 591 с. 10. *Карманов В. Г.* Математическое программирование / *В. Г. Карманов.* — М.: Наука, 1975. – 272 с. 11. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование / *Д. Химмельблау* – М.: Мир, 1975. – 534с. 12. *Сea Ж.* Оптимизация. Теория и алгоритмы – М.: Мир. – 1973. – 244.

Bibliography (transliterated): 1. *Zenkevich O.* Metod konechnyh jelementov v tehnikе / *O. Zenkevich.* – М.: Mir, 1975. – 541 s. 2. *Brul S. T.* Modelirovanie fiziko-mehaničeskikh processov v korpusah legkobronirovannyh mashin: podhody, modeli, jeffekty / *S. T. Brul, N. A. Tkachuk, A. Ju. Vasilev, I. N. Karapejchik* // *Mehanika ta mashinobuduvannja.* – 2011. – №1. – S. 66–73. 3. *Karapejchik I. N.* Rasshirennaja raschetno-jeksperimentalnaja identifikacija parametrov chislennyh modelej korpusnyh jelementov transportnyh sredstv specialnogo naznachenija / *I. N. Karapejchik, A. V. Litvinenko, S. T. Brul, N. A. Tkachuk, A. Ju. Vasilev* // *Visnik NTU «HPI».* Zb. nauk. prac. Tem.vip.: Mashinoznavstvo ta SAPR. – Harkiv : NTU «HPI», 2012. – № 22. – S. 69-77. 4. *Tkachuk N. A.* Parametricheskie modeli jelementov slozhnyh sistem kak osnova postroenija specializirovannyh raschetnyh shem / *N. A. Tkachuk, Ju. V. Veretelnik, Ju. Ja. Mirgorodskij, E. V. Peleshko* // *Mehanika ta mashinobuduvannja.* – Harkiv: NTU „HPI”, 2004.– № 2, t. 2. – S.79-84. 5. *Tkachuk N. A.* Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnyh mehanicheskikh sistem: tehnologija avtomatizirovannoj generacii i parametrizovannogo opisanija / *N. A. Tkachuk, G. D. Gricenko, A. D. Chepurnoj, E. A. Orlov, N. N. Tkachuk* // *Mehanika ta mashinobuduvannja* – Harkiv: NTU «HPI». – 2006. – №1. – S. 57-79. 6. *Tkachuk N. A.* Chuvstvitelnost prochnostnyh i zhestkostnyh harakteristik tonkostennyh jelementov mashinostroitelnyh konstrukcij k neravnomernomu izmeneniju tolshhiny / *N. A. Tkachuk, A. V. Litvinenko, A. V. Tkachuk, A. V. Grabovskij* // *Visnik SevNTU. Zbirnik naukovih prac. Vipusk 137/2013. Serija: Mehanika, energetika, ekologija.* – 2013. – S.187-191. 7. *Tanchenko A. Ju.* Vlijanie tolshhiny panelej na spektr sobstvennyh chastot kolebanij korpusov transportnyh sredstv specialnogo naznachenija / *A. Ju. Tanchenko* // *Visnik NTU «HPI».* Zb. nauk. prac. Serija: Mashinoznavstvo ta SAPR. – Harkiv : NTU «HPI», 2013. – №23 (996). – S. 138-145. 8. *Vasidzu K.* Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti: Per. s angl. – М.: Mir, 1987. – 542 s. 9. *Babakov I. M.* Teorija kolebanij / *I. M. Babakov.* – М.: Drofa. – 2004. – 591 s. 10. *Karmanov V. G.* Matematicheskoe programmirovanie / *V. G. Karmanov.* — М.: Nauka, 1975. – 272 s. 11. *Himmelblau D.* Prikladnoe nelinejnoe programmirovanie / *D. Himmelblau* – М.: Mir, 1975. – 534s. 12. *Sea Zh.* Optimizacija. Teorija i algoritmy – М.: Mir. – 1973. – 244.

Надійшла (received) 01.04.2014