

окремих елементів. Як ілюстрацію наведено методику та результати досліджень частот та власних форм коливань макета фрагменту корпусу БТР-80.

В статье предложено проводить расширенную расчетно-экспериментальную идентификацию параметров численных моделей корпусов транспортных средств специального назначения. От традиционного подхода эта идентификация отличается как большей базой экспериментальных испытаний, так и расширением количества испытанных объектов. Предлагается объединить в единственном расширенном цикле исследование натурных образцов бронекорпусов, их макетов, а также отдельных элементов. В качестве иллюстрации приведена методика и результаты исследований частот и собственных форм колебаний макета фрагмента корпуса БТР-80.

In the paper it is suggested to conduct the extended computational and experimental identification of numerical models parameters of special setting transport vehicles hulls. From traditional approach this identification differs as both larger experimental tests base and expansion of tested objects amount. It is suggested to unite the research of armoured hulls sample, their prototypes and also their separate elements in single extended loop. The methodology and researches results of vibrations frequencies and own forms of BTR-80 hull fragment prototype are presented as illustration.

Введение. Анализ физико-механических процессов и состояний в бронекорпусах транспортных средств специального назначения в настоящее время достаточно успешно производится при помощи численных методов, в частности, метода конечных элементов (МКЭ) [1]. При этом, естественно, на первом этапе исследований создается физическая модель процесса или состояния, его математическая и численная модели, а затем производится цикл расчетов, анализ результатов которых может быть положен в основу проектных или технологических решений для конкретного объекта. В этой цепочке моделей несколько уязвимых мест. Они в первую очередь концентрируются на этапе создания адекватной, достоверной и точной численной модели исследуемого объекта. Действительно, результаты, полученные с ее помощью, лежат в основе достаточно ответственных решений. В то же время только внутренние средства МКЭ не дают возможности в полной мере обеспечить адекватность, достоверность и точность создаваемых конечно-элементных моделей (КЭМ).

С этой точки зрения естественным является экспериментальное их обоснование. Однако натурный образец, поступающий в распоряжение исследователей, появляется лишь как опытная или серийная машина. На этих этапах внесение изменений сначала в численную модель, а затем в конструкторскую и технологическую документацию достаточно затратно по длительности, ресурсам и эффективности.

В связи с этим в ряде работ [2-4] предлагается включить в цикл проектных исследований идентификацию параметров численных моделей бронекорпусов по макетным образцам, однако данный подход не является системным и комплексным. Для устранения указанных недостатков в данной статье предложен расширенный подход к идентификации параметров численных моделей корпусных элементов транспортных средств специального назначения.

Постановка задач исследований. Поставленная проблема требует решения следующих задач:

УДК 623.438:539.3

И.Н. КАРАПЕЙЧИК, канд. эк. наук, ген. директор ПАО „Азовмаш”, Мариуполь;
А.В. ЛИТВИНЕНКО, канд. техн. наук, гл. инж. проекта спец. конструкторского отдела научн.-техн. комплекса ЗАО “АзовЭлектроСталь”, Мариуполь;
С.Т. БРУЛЬ, канд. техн. наук, директор департамента МО Украины, Киев;
Н.А.ТКАЧУК, докт. техн. наук, проф., зав. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ”;
А.Ю. ВАСИЛЬЕВ, м. н. с. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ”, Харьков

РАСШИРЕННАЯ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

У статті запропоновано проводити розширену розрахунково-експериментальну ідентифікацію параметрів числових моделей корпусів транспортних засобів спеціального призначення. Від традиційного підходу ця ідентифікація відрізняється як більшою базою експериментальних випробувань, так і розширенням кількості випробуваних об'єктів. Пропонується об'єднати у єдиному розширеному циклі дослідження натурних зразків бронекорпусів, їх макетів, а також

- разработка общей структуры проведения исследований;
- определение средств численного и экспериментального исследования бронекорпусов;
- проведение отдельных исследований на макетных образцах и определение требуемого типа конечных элементов (КЭ) и густоты конечно-элементных разбинок в КЭМ (в данном случае – на примере корпуса бронетранспортера) по итогам данного этапа.

Общая структура расчетно-экспериментальной идентификации параметров численных моделей корпусных элементов транспортных средств специального назначения. Для устранения недостатков, присущих традиционным подходам к решению задач идентификации параметров численных моделей корпусных элементов, предлагается процесс исследований, соединяющий оперативность, точность, масштабируемость и преемственность. На рис. 1 приведены отдельные этапы, встроенные в единую структуру расчетно-экспериментальных исследований.

В этом процессе предлагается четырехуровневое постадийное связанное определение параметров численных моделей. На этапе 1 (см. рис. 1) проводится исследование численной и экспериментальной моделей отдельного элемента бронекорпуса. Это может быть характерное сварное соединение, деталь усиления с бронепанелью или отдельная бронепанель. Основными вопросами на этом этапе является моделирование свойств материалов, типы возможных конечных элементов, вид статического или динамического напряженно-деформированного состояния (НДС).

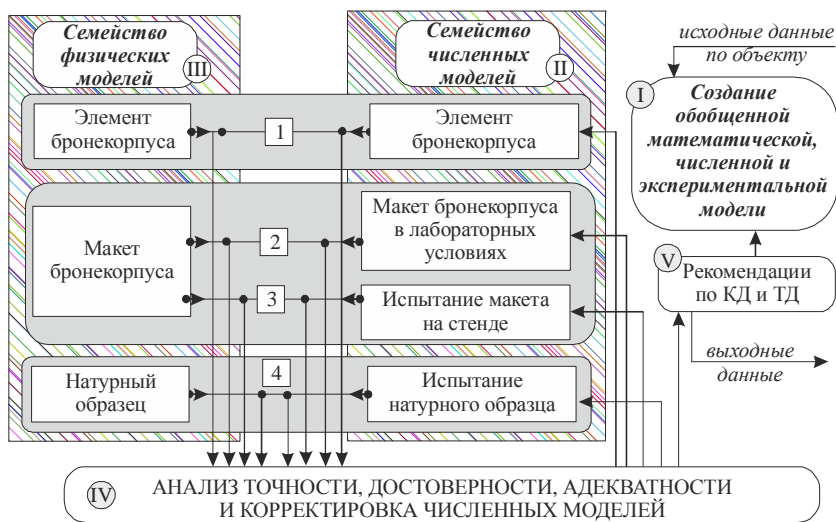


Рис. 1. Многоуровневая структура расширенной идентификации параметров численных моделей корпусных элементов транспортных средств специального назначения

На этапах 2 и 3 проводятся численное и экспериментальное исследование свойств макета бронекорпуса или отдельного его фрагмента. Здесь основной целью исследований является определение достоверности результатов динамического анализа. При этом на этапе 2 анализ проводится относительно точности отображения численной моделью соответствующих свойств объекта (например, собственных форм и частот колебаний), а на этапе 3 – точность описания реакции на внешнее воздействие. Итогом этапов 1-3 является в той или иной степени обоснованная конечно-элементная модель бронекорпуса, сбалансированная по требованиям точности и объема. Именно построенная по итогам этапов 1-3 КЭМ используется для создания модели натурального объекта. На этапе 4 проводится анализ данных, полученных при численных и экспериментальных исследованиях уже натурального образца бронекорпуса.

На каждом из этапов по критериям точности, адекватности и достоверности проводится качественное и количественное улучшение характеристик конечно-элементной модели. Такая „горизонтальная” интеграция моделей в отдельных слоях дополняется „вертикальной” интеграцией моделей разного уровня 1-4. Тем самым сам процесс создания более точной модели становится итерационным и эволюционным: от более простых – к более сложным, причем начальными приближениями для моделей старшего уровня служат конечные модели нижних уровней. Таким образом, стратификация расчетно-экспериментальных моделей не разъединяет, а интегрирует все множества моделей. Этапы I-IV, таким образом, являются связанными как внутренне (по структуре и параметрам моделей), так и внешне (по системам „обратных” связей, по которым изменение моделей старших уровней может потребовать изменение моделей младших уровней). Кроме того, в процесс исследований добавлена следующая особенность: все получаемые на каждом из уровней 1-4 (а не только на завершающем, четвертом) результаты служат для выработки рекомендаций для этапа V (см. рис. 1). Это свойство повышает оперативность и эффективность расчетно-экспериментальных исследований, привнося инструмент имплементации и корректирования текущего варианта конструкторской и технологической документации параллельно и взаимосвязанно с проведением данных исследований.

Формализация критериев. Очевидным требованием к усложненному процессу расчетно-экспериментальных исследований, представленному на рис. 1, является его структуризация, систематизация и организация. Этому может послужить множество взаимосвязанных критериев, структура которых отражает взаимоотношения этапов, представленных на рис. 1, а их удовлетворение порождает в конечном итоге достоверную, адекватную, точную и сбалансированную модель физико-механических процессов и состояний в исследуемых бронекорпусах.

Для формирования множества критериальных соотношений рассмотрим множество распределений физических величин u_N^q, u_E^q , где индексы «N» и «E» определяют, что они относятся к численным и экспериментальным моделям соот-

ветственно; $q = \{1, 2, 3, 4\}$ - номер слоя в соответствии с многоуровневой структурой (см. рис. 1). Тогда, обозначая множество параметров этих моделей через P_N^q, P_E^q , формируются обобщенные пространства параметров и состояний:

$$U_N = \bigcup_q u_N^q; U_E = \bigcup_q u_E^q; P_N = \bigcup_q P_N^q; P_E = \bigcup_q P_E^q. \quad (1)$$

Вводим меру несоответствия результатов численных и экспериментальных исследований, определяемую как функционал

$$I(U_N, U_E) = \sum \gamma_q I_q(u_N^q - u_E^q) = \sum_m \gamma_q \|u_N^q - u_E^q\|, \quad (2)$$

где γ_q - весовые коэффициенты, определяемые экспериментальным путем с учетом значимости моделей соответствующих слоев, $\|\cdot\|$ - некоторая норма несоответствия полей или распределений u_N^q, u_E^q .

Выражение норм в правой части (2) могут быть самыми многообразными и зависят от специфики решаемой на конкретном этапе задачи. В итоге синтезированная по соотношениям (2) модель обладает большим уровнем точности и достоверности, чем создаваемая по парциальным критериям.

Частная задача. Лабораторное определение спектра собственных частот макета фрагмента бронекорпуса. Проиллюстрируем применение предложенного подхода на примере расчетно-экспериментального исследования макета фрагмента бронекорпуса (этап 2, см. рис. 1). В частности, исследованиям подвергались макеты бронекорпусов машин типа БТР-80 и МТ-ЛБ. В соответствии с методикой исследования строится физическая и конечно-элементная модели этих объектов (рис. 2), для которых соответственно экспериментальным и численным путем определяются собственные формы колебаний $\varphi_{E,i}^{(2)}, \varphi_{N,i}^{(2)}$, а также спектры собственных частот колебаний $\nu_{E,i}^{(2)}(\omega_{E,i}^{(2)})$, $\nu_{N,i}^{(2)}(\omega_{N,i}^{(2)})$, после чего производится расчет интегрального несоответствия измеренных $\nu_{E,i}^{(2)}$ и рассчитанных $\nu_{N,i}^{(2)}$, причем сопоставляются частоты, соответствующие идентичным собственным формам (это множество номеров форм - частот

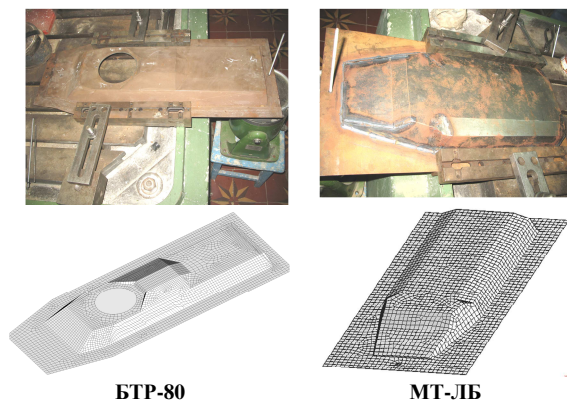


Рис. 2. Физические и конечно-элементные модели верхней части бронекорпусов БТР-80 и МТ-ЛБ

обозначается S):

$$I_2 = \sum_{s \in S} \left[\left| \nu_{E,s}^{(2)} - \nu_{N,s} \right| / \nu_{N,s} \right]. \quad (3)$$

Поскольку $\nu_{N,s} = \omega_{N,s} / 2\pi$ получаются в результате определение корней векового уравнения относительно $\omega_{N,s}^2$

$$\text{Det}(K - \omega^2 M) = 0, \quad (4)$$

где K, M - матрица жесткости и матрица масс соответствующего текущего конечно-элементного ансамбля, который определяется, в том числе, множеством варьируемых параметров p_N , то матрицы $K = K(p_N)$, $M = M(p_N)$ зависят от этих параметров, и, значит, корни уравнения (4) косвенно зависят от параметров p_N :

$$\omega_i^2 = \omega_i^2(p_N). \quad (5)$$

Таким образом, подставляя вычисленные после этого $\nu_{N,s}$ в (3), получаем для определения p_N критерий

$$p_N^* = \arg \min I_2(\nu_N(p_N)). \quad (6)$$

В рассматриваемом частном случае для макетов верхней части бронекорпусов БТР-80 и МТ-ЛБ были проведены лабораторные измерения на вибростенде (рис. 3, 4). Примеры зарегистрированных при этом форм колебаний представлены на рис. 5, а на рис. 6-8 - спектры собственных частот, зафиксированные экспериментально. Здесь же, на рис. 8, приведены для сравнения спектры, рассчитанные по КЭМ, созданные с использованием конечных элементов типа Shell. Установлено, что дальнейшее сгущение конечно-элементных сеток по сравнению с приведенными на рис. 2 не приводит к существенной минимизации выражения (3). При этом достигнута величина $I_2 \approx 0,05$, хотя при выборе начального приближения получали $I_2 = 0,15 \div 0,22$.

Таким образом, получили трех-четырёхкратный прирост точности, оста-



Рис. 3. Крепление моделей и возбуждение собственных форм колебаний на вибростенде



Рис. 4. Аппаратура для генерирования частоты возбуждения сигналов, их усиления и подачи на электрический вибровозбудитель



БТР-80

МТ-ЛБ

Рис. 5. Формы колебаний, зарегистрированные в ходе лабораторных измерений

ваясь в рамках КЭМ приемлемого размера. Несмотря на то, что при этом был задействован только частный критерий I_2 , полученная КЭМ может быть рекомендована для использования на этапах 2, 3 и 4 как достаточно сбалансированная и отражающая в целом жесткостные и инерционные свойства моделируемой пространственной конструкции.

Заключение.

Предложенный в работе подход к обоснованию расширенной расчетно-экспериментальной идентификации параметров численных моделей корпу-

сных элементов транспортных средств специального назначения обладает преимуществами перед традиционными методиками, которые заключаются в том, что обеспечивается сквозное многоуровневое обоснование параметров КЭМ исследуемых объектов. При этом улучшается качество конечно-элементного моделирования на всех этапах исследований, и, соответственно, определения рациональных конструктивных и технологических параметров изделия. В данном случае на частных примерах макетов верхней части корпусов боевых машин типа

БТР-80 и МТ-ЛБ проведены численные и лабораторные исследования их спектров. Путем целенаправленной модификации КЭМ достигнута погрешность численных моделей на уровне 5%.

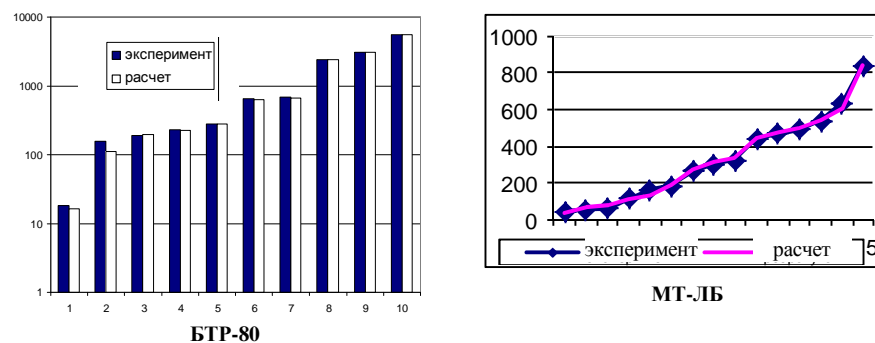


Рис. 6. Спектры экспериментально измеренных и рассчитанных (МКЭ) собственных частот колебаний макетов верхней части бронекорпусов БТР-80 и МТ-ЛБ

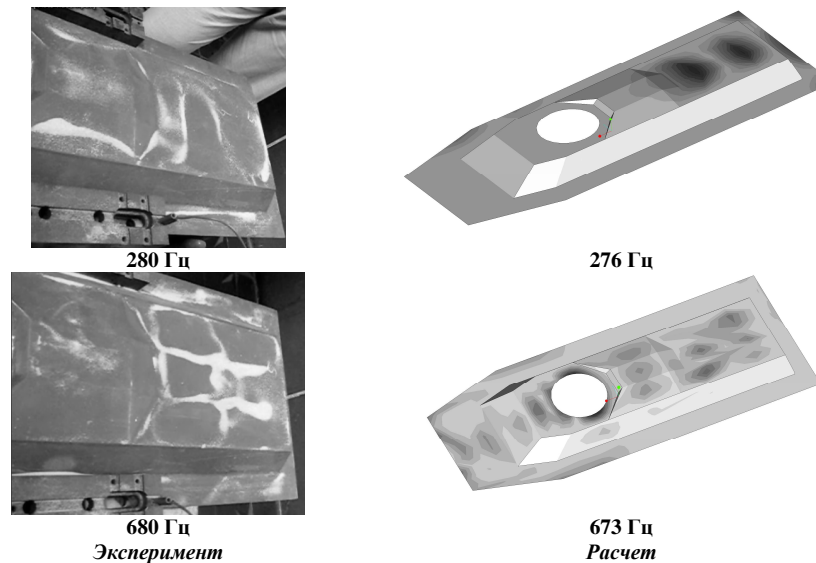


Рис. 7. Некоторые формы колебаний модели верхней части корпуса БТР-80

Описанные исследования соответствуют этапу №2 в предложенной комплексной структуре расчетно-экспериментальных исследований. Этап №1 описан в статье [8], а этап №3 – в статье [9] этого сборника.

В ходе дальнейших исследований предполагается применить данную ко-

нечено-элементную модель для анализа динамических характеристик натурального образца бронекорпуса (этап № 4).

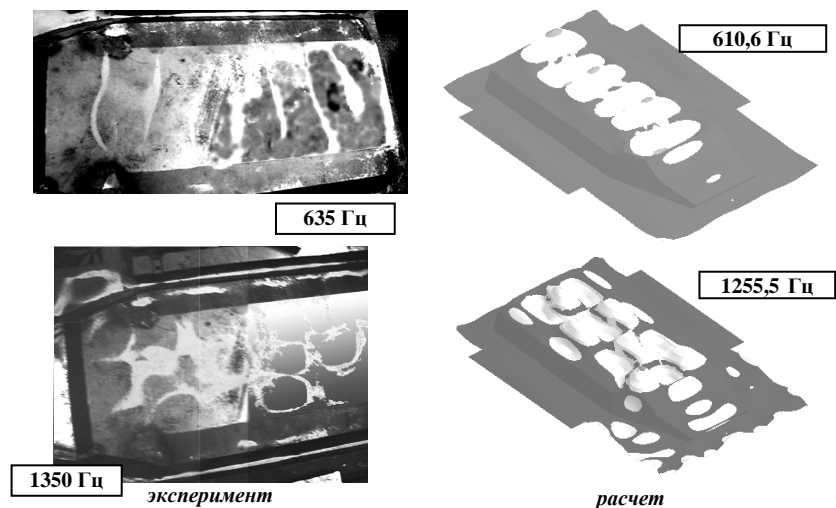


Рис. 8. Сравнение собственных форм и частот колебаний макета МТ-ЛБ, полученных экспериментальным и расчетным путем

Список литературы: 1. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 2. Параметрические модели элементов сложных систем как основа построения специализированных расчетных схем / *Н. А. Ткачук, Ю. В. Веретельник, Ю. Я. Миргородский и др.* // *Механiка та машинобудування.* – Харкiв: НТУ „ХПГ”. – 2004. – № 2, т. 2. – С.79-84. 3. Решение задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем / *Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Э. В. Глуценко и др.* // *Механiка та машинобудування.* – Харкiв: НТУ „ХПГ”. – 2004.– № 2, т. 2. – С.85-96. 4. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / *Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной и др.* // *Механiка та машинобудування.* – Харкiв: НТУ „ХПГ”, 2006. – №1. – С. 57-79. 5. Комплексне дослідження мiцностi та жорсткостi корпусiв транспортних засобiв спецiального призначення / *Є.В. Пелешко, М.А. Ткачук, С.Т. Бруль и др.* // *Вестник НТУ „ХПГ”. Тем. вип.: Транспортное машиностроение.* – 2010. – № 39. – С. 116-131. 6. *Основы обобщенного параметрического описания сложных механических систем / Ткачук Н.А., Чепурной А.Д., Гриценко Г.Д. и др.* // *Вiсник Схiдноукраїнського національного університету ім. В. Даля.* – 2007. – №9(115), част. 1. – С.196-205. 7. Экспериментальные исследования динамических процессов в макетах бронекорпусов транспортных средств специального назначения / *Г.Д. Гриценко, Н.А. Ткачук, Е.В. Пелешко и др.* // *Вiсник НТУ „ХПГ”. Тем. вип.: Машинознавство та САПР.* – 2009. – № 28. – С.16-19. 8. *Карапейчик И.Н.* Методика экспериментальных исследований реакции корпусов бронетранспортеров на локальное импульсное воздействие / И.Н. Карапейчик // *Вiсник НТУ „ХПГ”. Тем. вип.: Машинознавство та САПР.* – 2012. – № 22. – С.65-69. 9. Расчетно-экспериментальные исследования реакции бронекорпусов военных колесных и гусеничных машин на ударно-импульсное воздействие / *Миргородский Ю.Я., Белов Н.Л., Карапейчик И.Н. и др.* // *Вiсник НТУ „ХПГ”. Тем. вип.: Машинознавство та САПР.* – 2012. – № 22. – С.87-92.

Поступила в редколлегию 30.01.12