

УДК 629.113

И. Хармати<sup>1</sup>, А. Ровид<sup>2</sup>, П. Варлаки<sup>3</sup>**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОДБОРА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ  
ДЛЯ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

(РЕФЕРАТ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ)

Университет Иштвана Сечени<sup>1</sup>,  
Обудский университет (Венгрия)<sup>2</sup>,  
Будапештский университет технологий и экономики (Венгрия)<sup>3</sup>

При анализе дорожно-транспортных происшествий особое внимание уделяется механике деформирования несущих систем транспортных средств, при этом важную роль играют методы моделирования аварийных ситуаций, позволяющие получить графики изменения разрушающей нагрузки и поглощаемой кинетической энергии удара. Применение подходов, основанных на методе конечных элементов, позволяет, как правило, с высокой степенью точности смоделировать процесс аварийного нагружения, тем не менее, требует большого массива информации как об условиях ударного столкновения, так и о конструкции исследуемых транспортных средств. Параллельно с этим существуют более упрощенные методы, но они не позволяют получить достоверных результатов. В данной статье рассматривается использование метода подбора линейных переменных (*LPV-HOSVD*) для решения задач по исследованию дорожно-транспортных происшествий, характеризуемого хорошей точностью получаемых результатов, а также малыми вычислительными затратами.

*Ключевые слова:* дорожно-транспортное происшествие, модель изменения разрушающей нагрузки, модель линейных переменных (*LPV*), тензорное преобразование произведения, разложение по сингулярным числам матрицы высшего порядка (*HOSVD*).

Одной из наиболее важных задач автозаводов является производство автомобилей, обладающих высоким уровнем активной и пассивной безопасности. При этом в области механики дорожно-транспортных происшествий (ДТП), анализе и реконструкции аварийных ситуаций, наиболее важным оцениваемым параметром является характер изменения поглощаемой энергии удара, дающий полное представление о процессе ударного нагружения. Известно, что выполнение исследований по данному направлению требует насыщенной базы данных, содержащей результаты натуральных испытаний, а также результаты компьютерного моделирования аварийных ситуаций, на основе которых возможна разработка моделей транспортных средств, необходимых для оценки безопасности и прочности. В то же время очевидно, что для инженерной практики наиболее ценным является использование максимально простых моделей, позволяющих с достаточной степенью точности описать характер изменения разрушающей нагрузки и кинетической энергии, но не требующих большого массива данных о конструктивных параметрах транспортного средства [1–3].

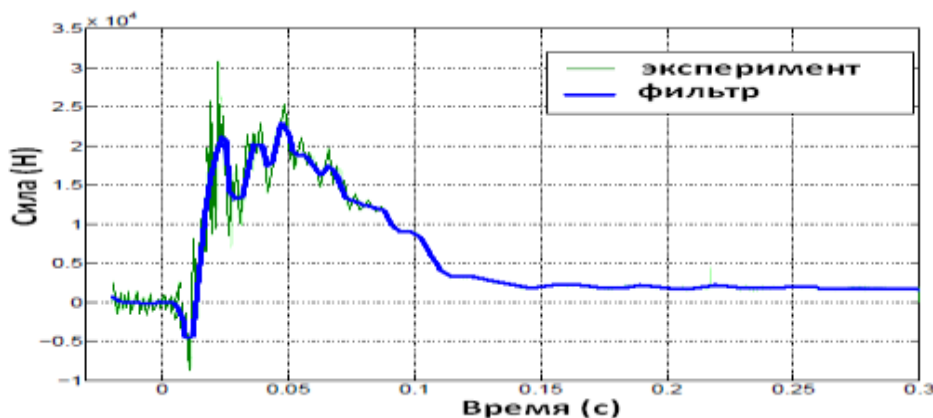
Существует большое разнообразие инструментов, разработанных для реконструкции и анализа аварийных ситуаций, тем не менее, для детального воссоздания условий быстропротекающих процессов, они требуют ввода достаточно точных данных. Наиболее распространенным способом моделирования существенно нелинейных процессов (не только в области анализа ДТП) является использование метода конечных элементов (МКЭ) [4–7]. Такой подход дает полное описание всего процесса деформации исследуемой конструкции, но требует детального и достаточно точного знания параметров геометрии автомобиля, свойств материалов (которые в общем случае неизвестны), при этом расчеты с помощью МКЭ требуют существенных вычислительных ресурсов и обстоятельств, а также о свойствах материала транспортного средства (которые не известны точно), и, как следствие, огромного количества свободы, компьютерного моделирования требует очень больших вычислительных мощностей.

В связи с этими, более рациональным является подход, не требующий подробной информации о процессе столкновения, но позволяющий получить адекватные значения наиболее важных параметров, характеризующих исследуемый процесс (например, характер изменения разрушающей нагрузки и поглощенной энергии удара). В этом случае становится возможным использование более простых моделей [1], [3], [8], [9–11].

В статье приводится модель, описывающая процесс деформирования конструкции транспортного средства, которая позволяет получить относительно точные значения разрушающей нагрузки и поглощаемой энергии в зависимости от времени удара. Результаты, полученные с использованием созданной модели, хорошо согласуются с данными ранее проведенных расчетно-экспериментальных исследований, при этом работа с моделью не требует существенных вычислительных и временных затрат.

Авторы отмечают, что наиболее распространенным испытанием при оценке пассивной безопасности транспортных средств является тест, при котором автомобиль соударяется с неподвижным деформируемым препятствием, оснащенным датчиками усилий. Во время испытаний, датчики установленные на автомобиле измеряют ускорения, а датчики барьера разрушающую нагрузку.

В статье использовались данные испытаний, полученные Национальной администрацией безопасности дорожного движения США (*NHTSA*). Данные экспериментальных исследований были сглажены с помощью *CFC60* фильтра (рис. 1). Значения деформаций были получены двойным интегрированием кривых ускорений, таким образом была возможность построить графики изменения нагрузки от времени и деформаций несущей конструкции от времени (рис. 2).



**Рис. 1. Графики изменения силы от времени (полученные при эксперименте и обработанные с помощью *CFC60* фильтра)**

Анализ графиков показывает, что начальный участок кривых может быть аппроксимирован линейной зависимостью, однако следующие области локального максимума и минимума кривой нагрузки требуют применения нелинейных зависимостей. Следует также обратить внимание на форму кривых в конечный момент времени, характеризующую одновременным уменьшением нагрузки и деформаций, что объясняется наличием эффекта упругого восстановления конструкции (рис. 3).

Указанные особенности были учтены при разработке новой математической модели, описывающей процесс фронтального столкновения автомобиля с препятствием, учитывающей как линейные так и нелинейные законы изменения жесткости конструкции при аварийном нагружении.

Учитывая тот факт, что характер поведения конструкции зависит от многих параметров, для упрощения модели были учтены только наиболее важные особенности, деформирования несущих систем автомобилей: жесткостные свойства определяют деформациями конструкции ( $x$ ), которые во многом зависят от скорости столкновения ( $v$ ).

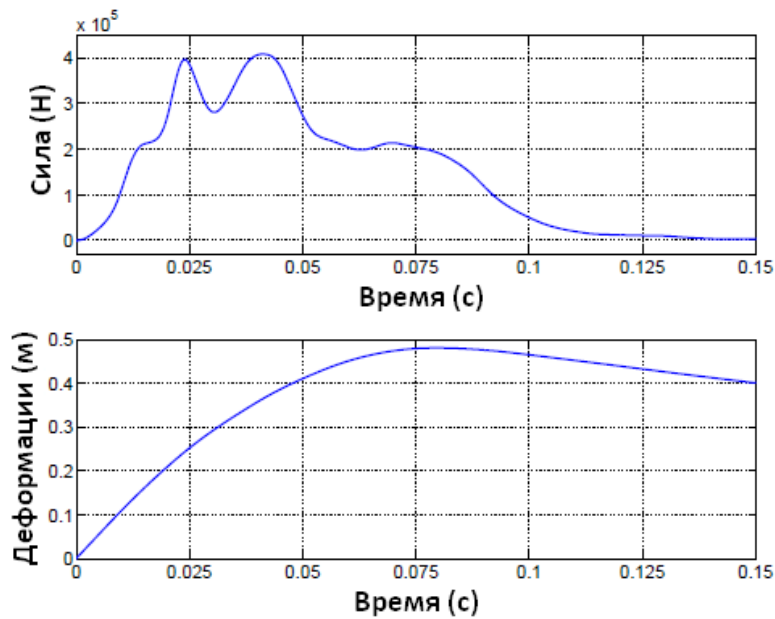


Рис. 2. Обработанные экспериментальные кривые изменения силы и деформаций в зависимости от времени

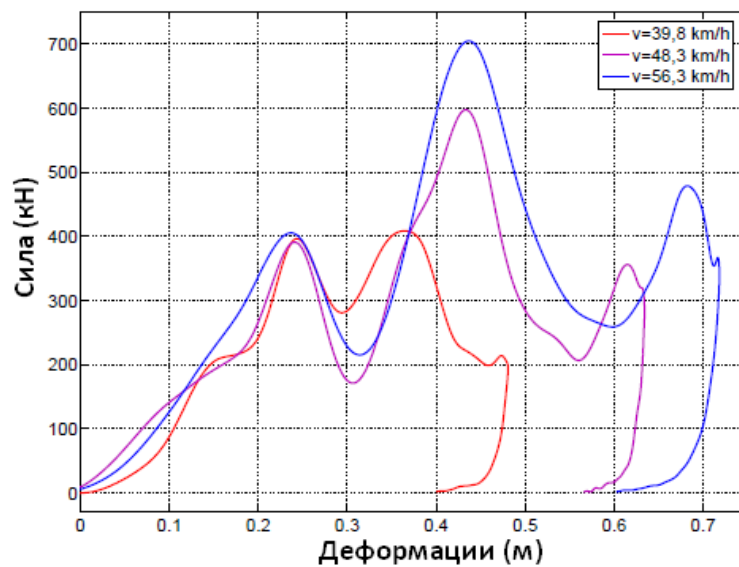


Рис. 3. Графики изменения нагрузки в зависимости от деформаций для одного и того же типа транспортного средства при разных скоростях столкновений

На основе изложенного за основу была принята следующая математическая зависимость, описывающая зависимость силы  $F$  от деформаций  $x$ , а также жесткости  $k$ , являющейся функцией  $x$  и скорости удара  $v$ :

$$F = k(x, v)x. \quad (1)$$

В дифференциальной форме справедливо следующее:

$$m\ddot{x} = k(x, v)x. \quad (2)$$

С учетом того, что  $k' = k(x, v)/m$ ,  $x_1 = x$  and  $x_2 = \dot{x}_1$  можно определить следующую матрицу:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ k' & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Для общей модели в пространстве состояний справедливо

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t)), \\ y(t) &= c(x(t)),\end{aligned}\quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}f(x(t)) &= \begin{pmatrix} x_2(t) \\ k(x_1(t), v) \end{pmatrix} \\ c(x(t)) &= (x_1(t) \quad 0).\end{aligned}\quad (5)$$

С учетом специфики метода подбора линейных переменных (*LPV*), можно записать

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = S(p(t)) \begin{pmatrix} x(t) \\ u(t) \end{pmatrix}.\quad (6)$$

При этом матрица  $S(p(t))$  записывается следующим образом

$$S(p(t)) = \begin{pmatrix} A(p(t)) & B(p(t)) \\ C(p(t)) & D(p(t)) \end{pmatrix},\quad (7)$$

где  $p(t) = (x_1(t), v)$ , а коэффициенты определяются следующими матрицами:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ k' & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix},\quad (8)$$

$$C = (1 \quad 0), \quad D = (0).$$

Важным является поиск функции  $k'$ , методы определения которой описаны в работах [13] и [14]. Прежде всего определяется функциональная зависимость  $k'$  от переменной  $x$  (деформации) и  $v$  (скорость соударения).

Для отладки модели используются экспериментальные кривые (деформации-время  $x(t)$  и сила-время  $F(t)$ ), так как жесткость  $k'$  – от  $x$ , а  $x$  зависит от времени  $t$ , то  $k'$  является функцией времени  $t$ , которое может быть вычислено из кривых  $F(t)$  и  $x(t)$ . При этом сопоставление модели с данными экспериментальных исследований проводится по числовым параметрам, полученным при различных скоростях столкновений.

Таким образом, получается набор частных моделей, хорошо описывающих конкретные условия аварийного нагружения. Анализ моделей позволяет определить функцию  $k'$ , наилучшим образом подходящую для всех рассматриваемых случаев.

На основе имеющейся базы экспериментальных данных были определены функции  $F(t, v)$  и  $x(t, v)$ , которые позволили определить функцию  $k(t, v)$  (рис. 4 – рис. 6).

Вычисления были выполнены с использованием пакета *Matlab TPTtoolbox*. С учетом разложения по сингулярным числам матрицы высшего порядка (*HOSVD*) был получен необходимый массив числовых значений (отличных от нуля).

На рис. 7– рис. 9 показаны графики экспериментальных кривых и кривых, полученных с использованием разработанной модели. Как видно из графиков, наилучшее сходжение результатов наблюдается на средних скоростях столкновения.

Очевидно, что в условиях аварийного нагружения кинетическая энергия удара переходит в энергию деформаций, при этом поглощаемая энергия представляет собой площадь под графиком сила-деформации  $F(x)$ .

Тем не менее, следует отметить что в процессе нагружения наблюдаются как остаточные так и упругие деформации. Этот факт необходимо учитывать при расчете энергоемкости кузовных конструкций.

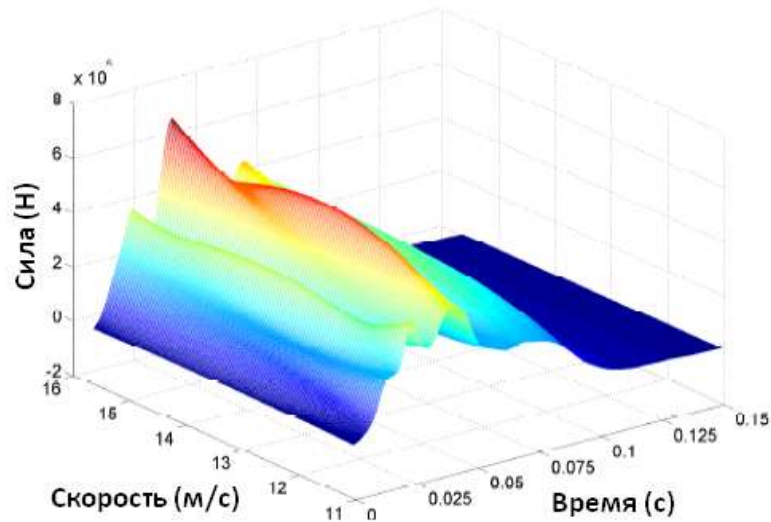


Рис. 4. Интерполированная поверхность зависимости силы от скорости и времени удара ( $F(v, t)$ )

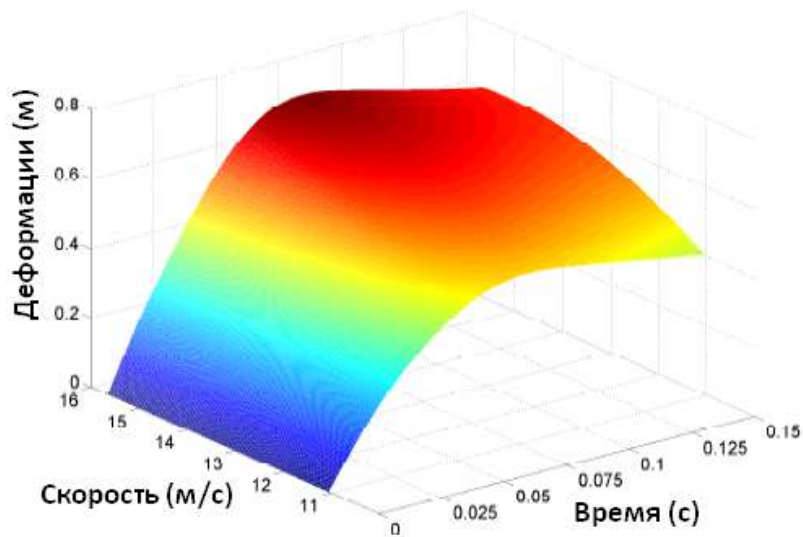


Рис. 5. Интерполированная поверхность зависимости деформации от скорости и времени удара ( $x(v, t)$ )

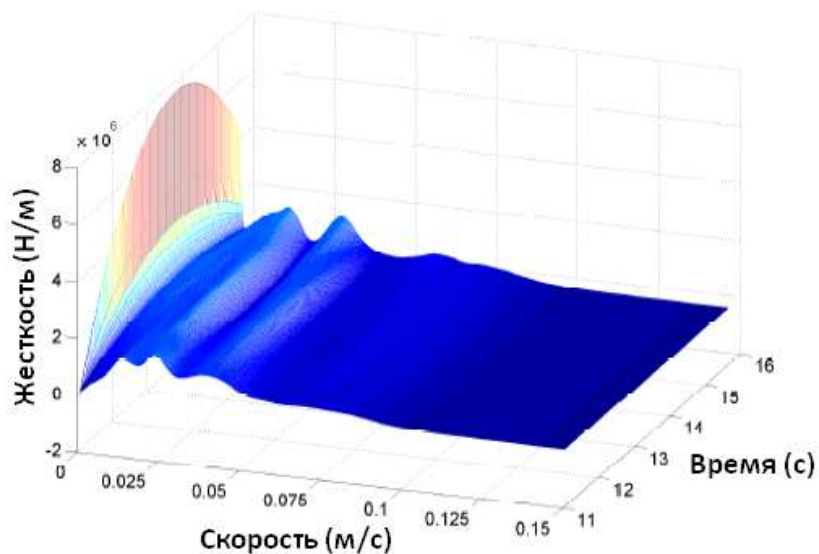


Рис. 6. Интерполированная поверхность зависимости жесткости от скорости и времени удара ( $k'(v, t)$ )

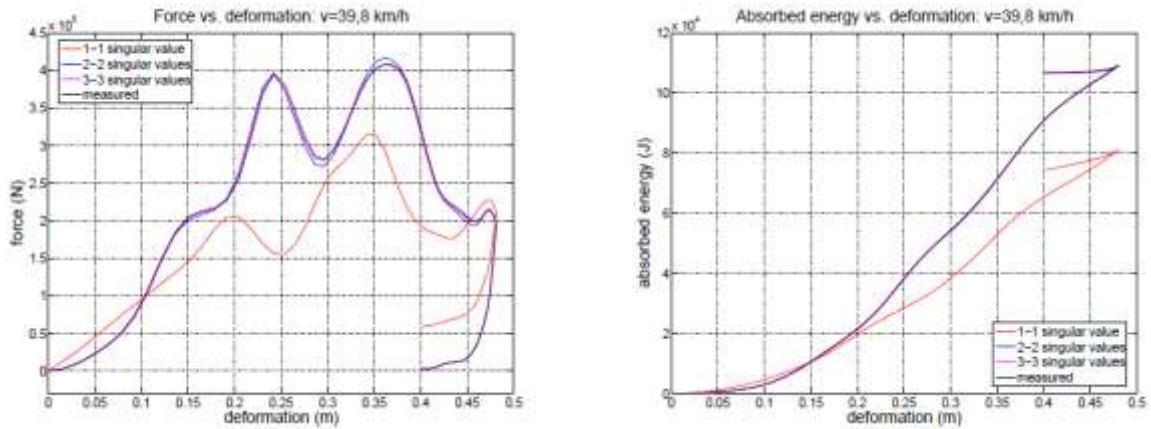


Рис. 7. Сравнение результатов расчетов с данными эксперимента (скорость удара 39.8 км/ч)

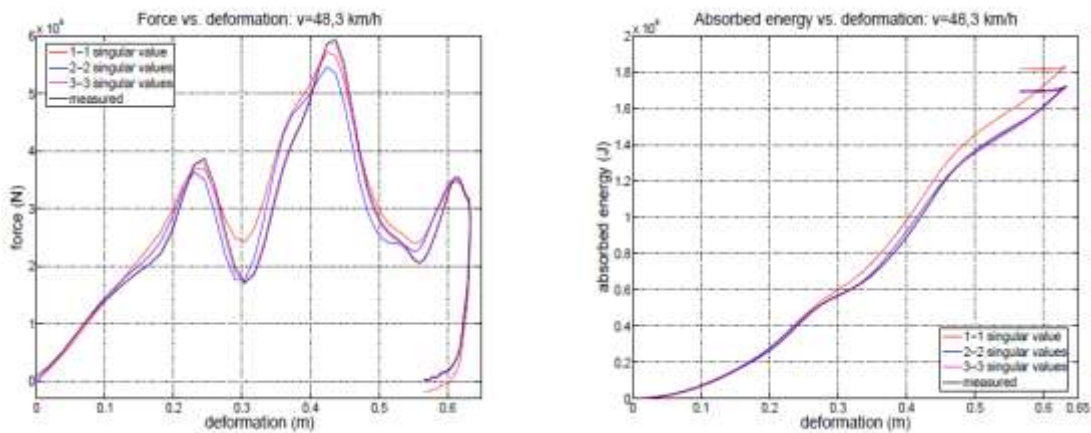


Рис. 8. Сравнение результатов расчетов с данными эксперимента (скорость удара 48.3 км/ч)

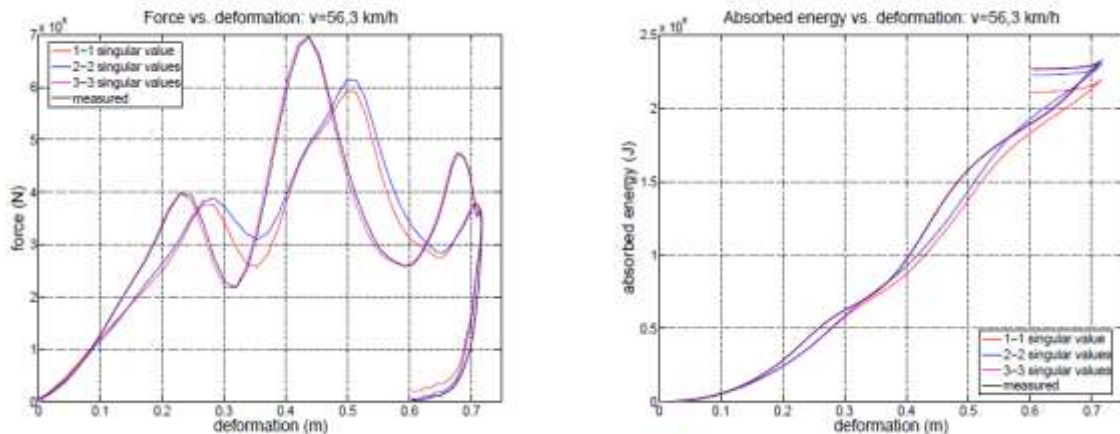


Рис. 9. Сравнение результатов расчетов с данными эксперимента (скорость удара 56.3 км/ч)

Таким образом, предложен новый метод расчетного исследования пассивной безопасности транспортных средств, основанный на использовании данных экспериментальных исследований и алгоритма подбора линейных переменных, не требующего существенных вычислительных и временных затрат и позволяющего получить удовлетворительную сходимость результатов.

Дата поступления  
В редакцию 02.11.2011