

УДК 629.3.023

А.П. Фалалеев, доцент, канд. техн. наук*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: a_falaleev@mail.ru***ОПТИМАЛЬНАЯ СДЕРЖИВАЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПАССАЖИРА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

Построена и исследована функция оптимальной сдерживающей системы для обеспечения безопасности пассажира транспортного средства при лобовом столкновении.

Ключевые слова: *пассивная безопасность, оптимальное замедление, столкновение автомобиля, удар.*

Одно из основных эксплуатационных свойств современного транспортного средства это безопасность. Независимо от оснащенности автомобиля активными средствами, предотвращающими ДТП актуальной остается задача обеспечения пассивной безопасности конструкции транспортного средства, то есть защита пассажиров и водителя при аварии.

Вопросы механического расчета конструкции в данном случае осложняются введением в систему биологического объекта – человека и необходимостью обеспечить его сохранность при столкновении. При создании систем пассивной безопасности важным является вопрос выяснения потенциальных возможностей силовой структуры кузова обеспечить минимальные повреждения пассажира при столкновении.

Задача оптимальной кинематики движения пассажира рассматривалась в работе [1], где на основе одномассовой модели кривая замедления была представлена в виде кусочно-линейной функции, а оптимальное управление определялось последовательно, с помощью итерационного подхода.

В работе [2] предложен энергетический подход для определения оптимального движения пассажира внутри салона. По заключению автора оптимальным является импульс прямоугольной формы.

Большое распространение при исследовании безопасности и поведения конструкции при столкновении получил метод конечных элементов. Несмотря на высокую трудоемкость подготовительного этапа, современные программные пакеты типа LS-DYNA (Ansys), Nastran дают высокую точность и адекватность при просчете динамических нагрузок в задачах проверки характеристик будущей конструкции. При определении оптимальных характеристик системы данные методы могут быть использованы только, как проверочные.

Наиболее распространенным и удобным при моделировании критерием пассивной безопасности является критерий повреждения головы (HIC – Head Injury Criterion) [3]. Данный критерий используют многие стандарты и программы безопасности транспорта (FMVSS, EuroNCAP, SAE, ISO) и задается в виде

$$HIC = (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \bigg|_{MAX}, \quad (1)$$

где $a(t)$ – замедление, испытываемое пассажиром, в долях g .

Расположение интервала времени $[t_2; t_1]$, на котором определяется значение HIC, выбирают из условия обеспечения максимально возможного значения критерия, при условии, что длительность интервала регламентирована значениями 15 мс или 36 мс. Среднестатистический взрослый мужчина при $HIC_{15} = 700$ или при $HIC_{36} = 1000$ с вероятностью 16 % получит серьезные или даже фатальные повреждения. Транспортное средство считается безопасным, если способно при лобовом столкновении обеспечить значения данного критерия в указанных пределах

Для определения потенциальных возможностей конструкции автомобиля обеспечивать безопасность пассажира интересным представляется поиск оптимального усилия со стороны сдерживающей системы (подушки безопасности) при торможении пассажира. Взаимодействие пассажира (водителя) с подушкой безопасности при лобовом столкновении может быть рассмотрено на примере одномассовой системы (рисунок 1).

Рассмотрим столкновение с момента касания головы пассажира массой M_p с подушкой безопасности (пунктирный прямоугольник, рисунок 1). К этой фазе удара автомобиль уже столкнулся с неподвижным препятствием и начал замедление за счет деформации передней части. Максимальное смещение головы пассажира ограничено величиной свободного хода L_p . Со стороны сдерживающей системы на тело пассажира действует сила реакции $F(t)$, исключая фазу свободного полета

пассажира до момента столкновения с деталями интерьера салона. Скорость V_0 , при которой пассажир контактирует со сдерживающей системой, будет определяться начальной скоростью движения автомобиля и скоростью деформации кузова. Решение задачи определения скорости контакта предложено в [2].

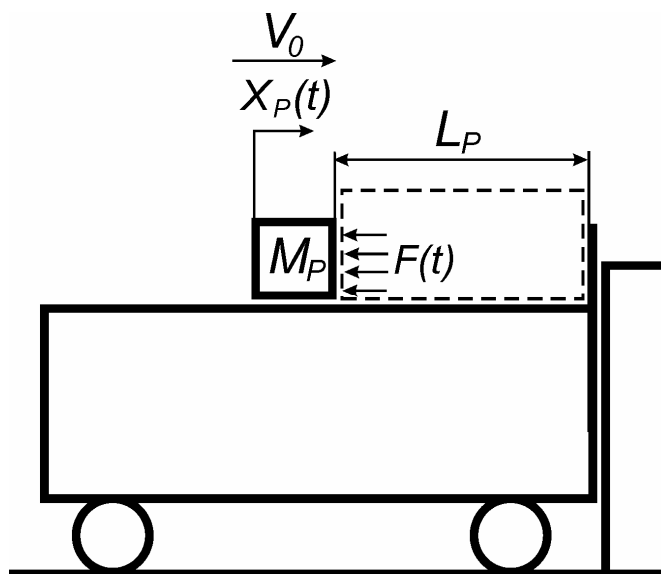


Рисунок 1 – Модель контакта пассажира со сдерживающей системой

Как известно, движение пассажира в этой фазе описывается дифференциальным уравнением

$$\ddot{X}_p(t) \cdot M_p = F(t) \quad (2)$$

с начальными условиями

$$X_p(0) = 0, \dot{X}_p(0) = V_0. \quad (3)$$

Пусть до момента первой остановки пассажир переместится на расстояние X_{pfin}

$$X_{pfin} = \max_{t>0} |X_p(t)| \quad (4)$$

Тогда можно сформулировать следующие задачи оптимального управления торможением пассажира:

Задача 1. Найти такую интегрируемую функцию $F = F(t)$, $t > 0$, которая обеспечит минимальное суммарное смещение головы пассажира X_{pfin} при условии обеспечения критерия травмирования головы (1) в пределах регламентированных значений.

Задача 2. Найти такую интегрируемую функцию $F = F(t)$, $t > 0$, которая обеспечит минимальное значение критерия травмирования головы (1) при условии, что суммарное смещение головы пассажира X_{pfin} будет равно величине возможного свободного хода L_p .

Решение задачи 2 направлено на обеспечения минимального травмирования пассажира и фактически демонстрирует потенциальную возможность любой существующей конструкции обеспечить безопасность пассажира.

Решение задачи 1 предпочтительнее на этапе дизайна, когда определяются основные геометрические параметры конструкции. Решение позволяет найти минимальные пространственные значения каркаса необходимые для обеспечения стандартов качества по пассивной безопасности.

Таким образом, для вопросов синтеза конструкции рационально рассматривать задачу 1 в следующей постановке. Для некоей пространственной конструкции, которая при лобовом столкновении должна обеспечить критерий безопасности (1) найти такой закон оптимального управления $F = F(t)$, $t > 0$, который обеспечит минимальную длину зоны поглощения энергии L_p , необходимую для смещения головы пассажира X_{pfin} .

Переписывая (1) с учетом (2) получим

$$HIC = \max_{t_1} \left(\frac{1}{\Delta^{3/2}} \left(\int_{t_1}^{t_1+\Delta} \frac{|F(t)|}{m} dt \right)^{5/2} \right) \leq H. \quad (5)$$

Тогда задачу оптимального управления можно записать в виде

$$L_P(F) = \min_{t>0} \{X_{Pfin}(F) \mid HIC(F) \leq H\}. \quad (6)$$

Очевидно, что задача 2 (6) является традиционной задачей о поиске оптимального управления при заданных ограничениях. Для ее решения выполним замену переменных, обеспечивающую нормирование функции (2) и ограничения (5) в виде

$$x_P = \frac{HIC_L^{2/3}}{V_0^{5/3}} X_P, \tau = \frac{HIC_L^{2/3}}{V_0^{5/3}} t, f = \frac{F}{M_P} \left(\frac{V_0}{HIC_L} \right)^{2/3},$$

$$\delta = \frac{HIC_L^{2/3}}{V_0^{5/3}} i, hic = \frac{HIC_L^{2/3}}{V_0^{8/3}} HIC, x_{Pfin} = \frac{1}{HIC_L} X_{Pfin}$$

Ограничение (5) примет вид

$$hic = \left(\frac{1}{\delta^{3/2}} \left(\int_{\tau_1}^{\tau_1+\delta} |f(\tau)| d\tau \right)^{5/2} \right)_{MAX} \leq 1. \quad (7)$$

Интегрируем уравнение (2) с учетом (7)

$$\int_0^t \ddot{x}_P(\tau) d\tau = \dot{x}_P(t) - 1. \quad (8)$$

Так как функция $f(\tau)$ описывает процесс торможения, то $f(\tau) \leq 0$, и $\int_0^t |f(\tau)| d\tau = -\int_0^t f(\tau) d\tau$.

Обозначим $w(\tau) = -\int_0^t f(\tau) d\tau$, и, с учетом (8), получим:

$$w(\tau) = 1 - \dot{x}_P(t).$$

Проведем преобразования неравенства (7)

$$\left(\delta^{-3/5} \int_{\tau_1}^{\tau_1+\delta} |f(\tau)| d\tau \right) \leq 1.$$

Тогда, с учетом (8), получим

$$\int_{\tau_1}^{\tau_1+\delta} f(\tau) d\tau \leq \delta^{3/5}. \quad (9)$$

Рассмотрим $\int_0^t f(\tau) d\tau$, где $t \in [\tau_1; \tau_1+\Delta]$. Так как

$$\int_t^{t+\delta} f(\tau) d\tau = w(t+\delta) - w(t), \quad (10)$$

то, с учетом (9),

$$w(\tau_1 + \delta) - w(\tau_1) \leq \delta^{3/5}. \quad (11)$$

Так как $w(0) = 0$, то на основе (11) получим $w(\delta) \leq \delta^{3/5}$ и, следовательно, $w(b\delta) \leq b\delta^{3/5}$.

Пусть $\tau_1 = b\delta$. Тогда $w(\tau_1 + \delta) \leq w(\tau_1) + \delta^{3/5}$, а следовательно, $w(\tau_1 + \delta) \leq b\delta^{3/5} + \delta^{3/5}$.

Обозначим $t = \tau_1 + \delta$. Тогда

$$w(\tau) \leq b\delta^{3/5} + (t - b\delta)^{3/5}$$

и

$$1 - \dot{x}_p(\tau) \leq b\delta^{3/5} + (\tau - b\delta)^{3/5},$$

то есть

$$\dot{x}_p(\tau) \geq 1 - b\delta^{3/5} - (\tau - b\delta)^{3/5}. \quad (12)$$

Интегрируя неравенство (12) с учетом (2), получим

$$x_p(\tau) \geq \tau - b\delta^{3/5}\tau - \frac{5}{8}(\tau - b\delta)^{8/5} + \frac{5}{8}(b\delta)^{8/5}.$$

Таким образом, нижняя грань $x_p(\tau)$, ($\tau > 0$),

$$x_p(\tau) = \tau - b\delta^{3/5}\tau - \frac{5}{8}(\tau - b\delta)^{8/5} + \frac{5}{8}(b\delta)^{8/5}. \quad (13)$$

Тогда $w(\tau) = 1 - \dot{x}_p(\tau) = b\delta^{3/5} + (\tau - b\delta)^{3/5} + \frac{5}{8}(b\delta)^{8/5}$, и искомая функция $f(\tau)$ определяется как

$$f(\tau) = -\dot{w}(\tau) = -\frac{3}{5}(\tau - b\delta)^{-2/5}, \quad \tau \in [b\delta; (b+1)\delta].$$

Максимальное значение $x_p(\tau)$ достигает при $t_0 = (b\delta^{3/5} - 1)^{5/3} + b\delta$, где $b = \lfloor \delta^{-3/5} \rfloor$, и

$$x_p(t)_{\max} = x_p(t_0) = \left((b\delta^{3/5} - 1)^{5/3} + b\delta \right) - b\delta^{3/5} \left((b\delta^{3/5} - 1)^{5/3} + b\delta \right) - \frac{5}{8} \left(\left((b\delta^{3/5} - 1)^{5/3} + b\delta \right) - b\delta \right)^{8/5} + \frac{5}{8}(b\delta)^{8/5}, \quad (14)$$

Итак, оптимальное уравнение

$$f(\tau) = \begin{cases} -\frac{3}{5}(\tau - b\delta)^{-2/5}, & b \cdot \delta < \tau \leq (b+1)\delta, \tau < t_0 \\ 0, & \tau > t_0 \end{cases}. \quad (15)$$

Проводя обратную подстановку окончательно запишем:

$$F(t) = \begin{cases} -\frac{3}{5} \left(\frac{HIC_L^{2/3}}{V_0^{5/3}} t - \frac{HIC_L^{4/15}}{V_0^{2/3}} i^{2/5} \right)^{-2/5} \frac{HIC_L^{2/3}}{V_0^{2/3}} M_P, & 0 \leq t \leq \frac{V_0}{HIC_L^{6/15}} i^{2/5}, \\ 0, & t > \frac{V_0}{HIC_L^{6/15}} i^{2/5}. \end{cases} \quad (16)$$

График, представленный на рисунке 2 демонстрирует закон оптимального управления торможением $f(\tau)$ в нормированном виде.

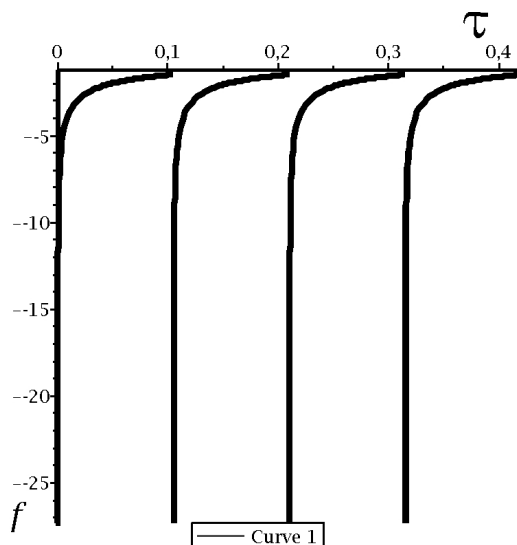


Рисунок 2 – Нормированное оптимальное управление $f(\tau)$ торможением пассажира при столкновении

График лежит в области отрицательных значений и непрерывен на интервале $b \cdot \delta < \tau < (b+1)\delta$ и монотонно возрастает. В точках $\tau = b \cdot \delta$ возникают разрывы управляющей функции. В существующих стандартах для интервала i (в нормированных величинах δ) используют только значения 0,015 мс и 0,036 мс, хотя в дальнейшем не исключено введение дополнительных значений. За время торможения до остановки, в зависимости от ширины интервала, управляющая функция может иметь несколько разрывов. Отрицательные значения свидетельствуют о том, что управляющее воздействие представляет собой силу, направленную в сторону обратную движению головы пассажира и стремящуюся замедлить это движение. Рассматривая абсолютное значение тормозящей силы можно отметить, что для оптимального торможения несмотря на высокие значения первоначального усилия сопротивления оно резко падает почти до нуля, затем в точке разрыва снова возрастает и несколько раз повторяя цикл оптимального торможения до тех пор пока тело не остановится. Таким образом, можно выделить единичный цикл оптимального торможения, который зависит от массы тела и начальной скорости столкновения.

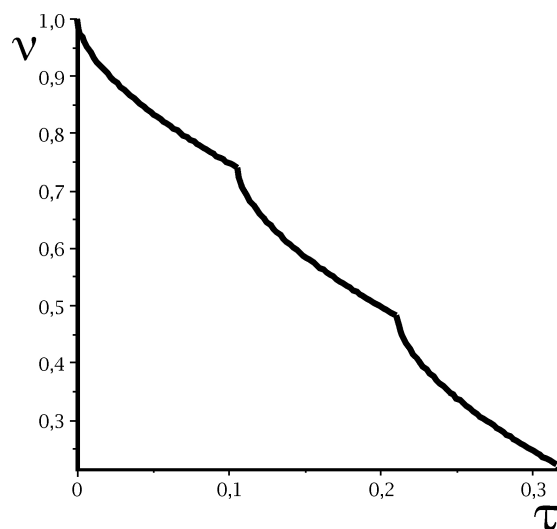


Рисунок 3 – График нормированной скорости движения головы пассажира

В отличие от закона управления торможением, функция скорости непрерывна, без разрывов. В точках разрывов закона управления скорость имеет некоторую пульсацию, хотя в целом монотонно падает до нуля.

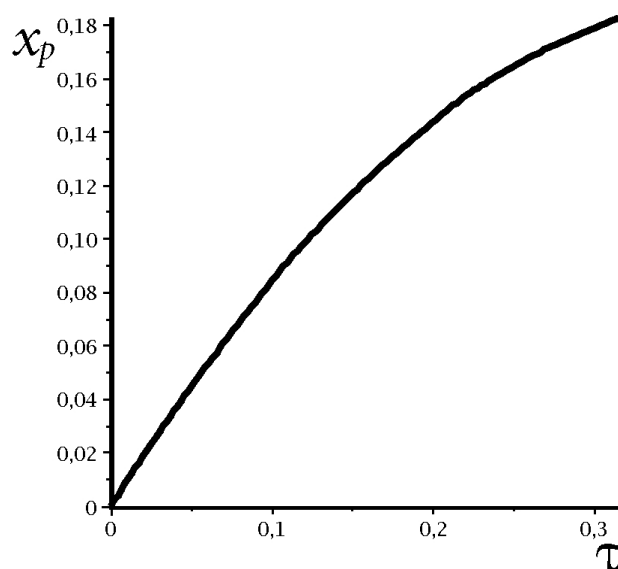


Рисунок 4 – График нормированного перемещения головы пассажира

Функция перемещения головы пассажира является монотонно возрастающей, разрывов и всплесков не содержит.

Полученный закон управления, является решением задачи (6) с учетом критерия травмирования головы (5). Реализация подобного закона является сложной научной и инженерной задачей, которая позволит создать ряд наиболее безопасных конструкций по критерию (5). Подобное поведение демонстрируют сотовые структуры, которые давно используются для поглощения энергии столкновения. Уравнение (16) в ненормированных величинах, позволяет осуществлять подбор параметров конструкций для поглощения энергии. Функция оптимального закона управления (рис.2) является идеальной формой, которую не представляется возможным реализовать конструктивно в настоящий момент, но может быть использована для оценки и сравнения с реальными законами торможения.

Библиографический список использованной литературы

1. Freic, P; Kaeser, R; Hafner, R. et. al. Crashworthiness and Compatibility of low Mass Vehicles in Collisions. SAE Technical Paper, No SAE-970122, 1997. — P. 35–43.
2. Huang M. "On Body Mount Crash Characteristics" SAE paper № 1999-01-10 International Body Engineering conference and Expositions, Detroit, Michigan, September 28–30 1999. Also in Journal of Passenger Cars SAE 1990, Transactions Section. — P. 3330–3342.
3. Bronzino, J.D. Biomedical Engineering Fundamentals / J.D. Bronzino. — Boca Raton.: CRC press: Taylor and Francis Group, 2006.

Поступила в редакцию 05.05.2011 г.

Фалалеев А.П. Оптимальна стримуюча система для забезпечення безпеки пасажирів при зіткненні транспортного засобу

Побудовано та досліджено функцію оптимальної стримуючої системи для забезпечення безпеки пасажирів транспортного засобу при лобовому зіткненні.

Ключові слова: пасивна безпека, оптимальне прискорення, зіткнення автомобілю, удар.

Falaleev A.P. Optimal occupant restriction system to provide safety standart during transport crash

Optimal restriction system function was build to provide safety standards during frontal transport crash

Keywords: passive safety, optimal deceleration, transport crash, impact.