

Расчет прочностной надежности и усталостной долговечности элементов конструкций мобильных машин, нагруженных случайными изгибающими и крутящими моментами

д.т.н. проф. Гусев А.С., к.т.н. проф. Щербаков В.И., к.т.н. доц. Стародубцева С.А.,
Гребенкина М.И.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Университет машиностроения,
8(499)-223-05-23, доб. 14-57; sopr@mami.ru

Аннотация. Предложена новая методика расчета на прочностную надежность и усталостную долговечность элементов металлоконструкций мобильных машин, испытывающих в эксплуатации одновременное нагружение несинхронными и несинфазными случайными изгибающими и крутящими моментами.

Ключевые слова: случайный процесс, напряжения, линеаризация, усталость материала, надёжность

Рассматриваются элементы металлоконструкций транспортных машин, испытывающие в эксплуатации одновременное воздействие несинхронных и несинфазных случайных изгибающих и крутящих моментов. Характерными в этом отношении являются элементы металлоконструкций транспортных машин, движущихся по дорогам со случайными неровностями и испытывающих при этом упругие колебания в продольной и поперечной плоскостях. Подобным же образом нагружены крупногабаритные сборные объекты химического машиностроения и другие аналогичные объекты при их транспортировке по дорогам со случайным профилем [1-5]. В этом случае имеем в наиболее нагруженных точках материала тонкостенных конструкций плоское напряженное состояние, схематично показанное на рисунке 1.

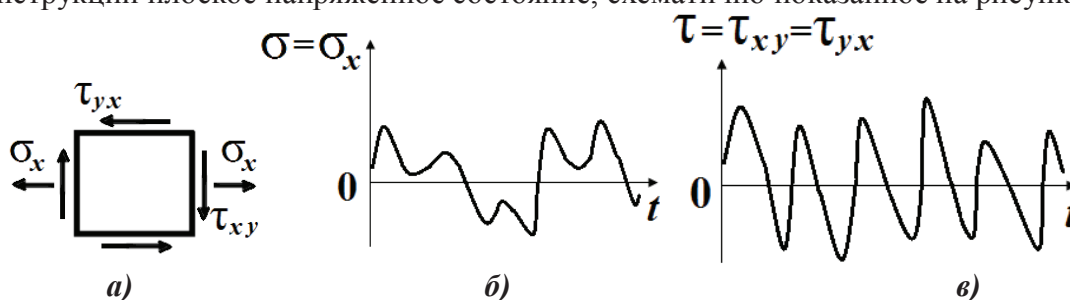


Рисунок 1. Случайное напряженное состояние изгиба с кручением: *a* – элемент напряженного состояния; *б, в* – процессы изменения нормального $\sigma(t)$ и касательного $\tau(t)$ напряжений

Исходная информация о векторе напряжений $\vec{\sigma} = (\sigma, \tau)^T$, где T – символ операции транспонирования матриц и векторов, получается либо расчетными методами статистической динамики, либо экспериментальными методами с использованием датчиков и приборов электротензометрии. В результате имеем матрицу корреляционных функций напряжений в виде:

$$K_{\vec{\sigma}}(\tau) = \begin{bmatrix} K_{\sigma}(\tau) & K_{\sigma\tau}(\tau) \\ K_{\tau\sigma}(\tau) & K_{\tau}(\tau) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

При этом принимаем, что $\sigma(t)$ и $\tau(t)$ являются гауссовскими стационарными случайными процессами с нулевыми средними значениями. В задачи расчета входят: определение вероятности внезапного отказа по прочности, оценка накопленного к заданному моменту времени усталостного повреждения, прогнозирование усталостной долговечности конструкции. Использование в таких расчетах различных теорий статической прочности часто приводит к сложным и малоэффективным решениям [7, 9].

В данной работе для этих целей будем использовать энергетическую теорию прочно-

сти. Однако вместо эквивалентного напряжения σ_y , определяемого по формуле:

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}, \quad \sigma_y \geq 0, \quad (2)$$

будем использовать энергетический параметр нагруженности материала $p(t)$ в следующем виде:

$$p(t) = \sigma(t) \cdot |\sigma(t)| + 3 \cdot \tau(t) \cdot |\tau(t)|, \quad (-\infty \leq p(t) \leq \infty), \quad (3)$$

который в отличие от эквивалентного напряжения (2) учитывает смену этапов растяжения и сжатия (смену знака).

Нелинейное соотношение (3) линеаризуем и заменяем на выражение:

$$p(t) = k_1 \cdot \sigma(t) + 3 \cdot k_2 \cdot \tau(t), \quad (4)$$

где коэффициенты линеаризации k_1 и k_2 вычислим по методу равенства дисперсий [3].

Имеем:

$$k_1 = \sqrt{3} \cdot s_\sigma, \quad k_2 = \sqrt{3} \cdot s_\tau, \quad (5)$$

где $s_\sigma^2 = K_\sigma(0)$, $s_\tau^2 = K_\tau(0)$ – дисперсии процессов $\sigma(t)$ и $\tau(t)$.

Дисперсии процесса $p(t)$ и его первых двух производных будут вычисляться по формулам:

$$s_p^2 = 3s_\sigma^4 + 18s_\sigma s_\tau s_{\sigma\tau}^2 + 27s_\tau^4, \quad s_{\dot{p}}^2 = 3s_\sigma^4 + 18s_\sigma s_\tau s_{\sigma\dot{\tau}}^2 + 27s_\tau^4, \quad s_{\ddot{p}}^2 = 3s_\sigma^4 + 18s_\sigma s_\tau s_{\sigma\ddot{\tau}}^2 + 27s_\tau^4, \quad (6)$$

$$s_{\sigma\tau}^2 = K_{\sigma\tau}(0), \quad s_{\dot{\sigma}}^2 = -\ddot{K}_\sigma(0), \quad s_{\dot{\tau}}^2 = -\ddot{K}_\tau(0), \quad s_{\dot{\sigma}\dot{\tau}}^2 = -\ddot{K}_{\sigma\tau}(0),$$

где:

$$s_{\ddot{\sigma}}^2 = K_{\sigma}^{IV}(0), \quad s_{\ddot{\tau}}^2 = K_{\tau}^{IV}(0), \quad s_{\ddot{\sigma}\ddot{\tau}}^2 = K_{\sigma\tau}^{IV}(0).$$

Эффективные частоты процесса $p(t)$ по нулям и по экстремумам будут определяться соотношениями:

$$\omega_o = \frac{s_{\dot{p}}}{s_p}; \quad \omega_y = \frac{s_{\ddot{p}}}{s_{\dot{p}}}. \quad (7)$$

Отношение числа экстремумов к числу нулей, являющееся параметром сложности структуры случайного процесса, определяется как [3]:

$$k = \frac{\omega_y}{\omega_o}. \quad (8)$$

Таким образом, имеем полную вероятностную информацию о процессе $p(t)$.

Вероятность того, что этот процесс за некоторое время t ни разу не превысит опасный уровень p_* (прочностная надежность) будет определяться по формуле:

$$P\{p(\tau) \leq p_*, \tau \in [0, t]\} = 1 - \frac{t \cdot s_{\dot{p}}}{2 \cdot \pi \cdot s_p} \cdot \exp\left(-\frac{p_*^2}{2 \cdot s_p^2}\right). \quad (9)$$

Здесь $p_* = \sigma_*^2$, где σ_* – либо предел текучести, либо предел прочности.

При расчете на усталостную долговечность стандартное уравнение кривой усталости в амплитудах напряжений σ и числах циклов до разрушения $N(\sigma)$ вида:

$$N(\sigma) = \begin{cases} N_o \frac{\sigma_{-1}^m}{\sigma^m}, & \sigma \geq \sigma_{-1}; \\ \infty, & \sigma < \sigma_{-1}, \end{cases}$$

где: N_o , σ_{-1} , m – параметры, теперь следует заменить на выражение:

$$N(p) = \begin{cases} N_0 \frac{p_{-1}^{m/2}}{p^{m/2}}, p \geq p_{-1} = \sigma_{-1}^2; \\ \infty, p < p_{-1}, \end{cases} \quad (10)$$

где p - амплитуда энергетического параметра циклической нагруженности.

Если через $f(p)$ обозначить плотность распределения вероятностей для амплитуд циклов процесса $p(t)$, то в соответствии с линейной гипотезой накопления усталостных повреждений число циклов до разрушения N_* можно вычислить по формуле:

$$N_* = \left(\int_0^{\infty} \frac{f(p) dp}{N(p)} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Дальнейшие вычисления связаны с трудностями определения цикла нагружения и его амплитуды для случайных процессов, для которых параметр сложности структуры $k \gg 1$. Именно к таким процессам относится процесс $p(t)$, состоящий из суммы двух случайных процессов, которые могут значительно отличаться как по интенсивности воздействия, так и по частоте. Эти вопросы решаются с помощью методов приведения процессов со сложной структурой к процессам с простой структурой, для которых параметр сложности $k = 1$. При этом к наибольшему повреждающему действию и соответственно к наименьшей оценке усталостной долговечности приводит метод максимумов, при котором все положительные минимумы и отрицательные максимумы мысленно переносятся на среднюю (нулевую) линию. Такой подход эквивалентен замене исходного процесса сложной структуры на процесс с простой структурой и релейской плотностью распределения амплитуд циклов [2, 3]:

$$f(p) = \frac{p}{s_p^2} \cdot \exp\left(-\frac{p^2}{2s_p^2}\right), \quad (12)$$

и частотой по “нулям” (7).

С учетом (7), (10), (11) и (12) получаем следующую формулу для расчета усталостной долговечности

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot s_p}{s_p} \cdot \frac{N_0 \cdot p_{-1}^{m/2}}{2^{m/4} \cdot s_p^{m/2} \cdot \Gamma\left(\frac{m}{4} + 1, p_{-1}^2 / (2s_p^2)\right)},$$

где: $\Gamma(\beta, \alpha) = \int_{\alpha}^{\infty} e^{-t} \cdot t^{\beta-1} \cdot dt$ - табулированная неполная гамма-функция, значения парамет-

ров которой $\beta = m / 2 + 1$ и $\alpha = \sigma_{-1}^2 / (2s_p^2)$.

Заключение

Таким образом, введение в рассмотрение энергетического параметра циклической нагруженности материала в сочетании со статистической его линеаризацией позволило эффективно решить задачу оценки прочностной надежности и усталостной долговечности элементов конструкций транспортных машин, находящихся в эксплуатации под одновременным воздействием изгибающих и крутящих моментов.

Литература

1. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990. 448 с.
2. Гусев А.С. Вероятностные методы в механике машин и конструкций. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 224 с.
3. Гусев А.С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках.

М.: Машиностроение, 1984. 245 с.

4. Гусев А.С. Случайные колебания деформируемых объектов при транспортировке. //Проблемы машиностроения и надежности машин. 1998. № 1.
5. Гусев А.С., Карунин А.Л., Крамской Н.А., Стародубцева С.А., Щербаков В.И. Теория колебаний в автомобиле- и тракторостроении. М.: Изд-во МГТУ «МАМИ», 2007. 336 с.
6. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1985. 223 с.
7. Щербаков В.И., Чабунин И.С., Стародубцева С.А. Избранные задачи по динамике механических систем и конструкций. Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Изд-во МГТУ «МАМИ», 2010. 288 с.
8. Whitney C.A. Random processes in physical systems. New York: John Willey, 1990. 320 p.

Интеллектуальное транспортное средство. Адаптация подсистемы определения взаимного положения движущихся транспортных средств

д.т.н. проф. Иванов А.М., к.т.н. Шадрин С.С., к.т.н. Карпухин К.Е.

МАДИ

8-499-155-03-84, auto@madi.ru

Аннотация. В настоящей статье рассмотрена история создания беспилотных автотранспортных средств, показано состояние разработок в России и мире, рассмотрены вопросы определения взаимного положения транспортных средств на основе технологий оптического слежения.

Ключевые слова: автотранспортное средство, беспилотное транспортное средство, интеллектуальные транспортные системы, автоматическое торможение, курсовое управление, оптическое слежение.

Идея создания беспилотного транспортного средства будоражит умы ученых и изобретателей во всем мире уже не один десяток лет. Разработки в этой области начались еще в конце 1970-х годов в Японии. В 1987-1995 годах в Европе существовал проект «Прометей», в ходе которого проводились эксперименты по управлению беспилотными автомобилями. Итогом этого проекта стало путешествие на расстояние 1600 км из Мюнхена в Копенгаген на машине Mercedes-Benz S-класса. Максимальная скорость на дороге составила 175 км/ч, в пути автомобиль выполнял сложные маневры по обгону других транспортных средств. Тем не менее полностью исключить человеческий фактор из процесса вождения не удалось – водителю приходилось вмешиваться в различных ситуациях.

Самыми удачными оказались разработки корпорации Google по созданию беспилотного автомобиля. Созданный ими автомобиль оборудован автопилотной системой, которая ориентируется на дороге при помощи множества специальных датчиков, собирающих информацию об окружающем пространстве. Это специальные камеры, лазерные радары, установленные на переднем и заднем бамперах, система GPS-навигации, колесный датчик, отслеживающий движение автомобиля и определяющий его положение, и блок инерциальных измерений. При этом автомобиль оборудован оригинальным лазерным светодальномером, который установлен на крыше беспилотного транспортного средства. Он считывает детальную объемную карту с окружающей среды, сравнивает полученную информацию с точными картами земли и вырабатывает данные, позволяющие автомобилю без проблем передвигаться в пространстве, не задевая других участников дорожного движения и не нарушая правила на дороге. Для эффективной работы автомобиля и точного определения его местонахождения используются тщательно проработанные карты мира. Поэтому перед тем как отправлять транспортное средство на беспилотный заезд, специалисты компании Google совершают пробную поездку по намеченному маршруту.

На сегодняшний день беспилотные автомобили Google на базе Toyota Prius и Lexus RX-450h проехали по американским дорогам уже около 500 000 километров, показав при этом