

УДК 699.841

Воробьева К.В., Зайнулабидова Х.Р., Фрезе М.В.

УЧЕТ ДЕМПФИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Vorobieva K.V., Zainalabidov H.R., Frese M.V.

ACCOUNTING OF DAMPING IN THE EVALUATION AND SEISMIC STABILITY TASKS OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Аннотация. Обосновано, что для большинства строительных конструкций характерно различное демпфирование в их элементах. Поставлена цель построения матрицы гистерезисного демпфирования, учитывающей внутреннее трение в материале. Исследование основывается на обобщенной гипотезе Е.С. Сорокина о пропорциональности матриц демпфирования и жесткости элементов конструкции. Приводятся методы учета демпфирования при оценке сейсмостойкости конструкций. Рассматриваются точный и приближенный методы разложения уравнений движения по формам колебаний. Установлено, что эмпирическим критерием применимости приближенного способа учета демпфирования и возможности его уточнения, исходя из начального приближения, могут служить коэффициенты корреляции форм колебаний.

Показано, что для непропорционального демпфирования возможно приближенное разложение движения по формам колебаний недемпфированной системы, если формы слабо коррелированы.

Ключевые слова: демпфирование, формы колебаний, разложение по формам, корреляция форм

Abstract. It is proved that for the majority of building structures characterized by different damping elements. The goal of constructing matrix hysteretic damping that takes into account the internal friction in the material. The study is based on generalized hypothesis of E. S. Sorokin on the proportionality of the matrices of damping and stiffness elements of the structure.

The methods of accounting for damping in the evaluation of the earthquake resistance of structures. The exact and approximate methods of decomposition of the motion equations for the mode shapes are considered. It is established that the empirical criterion of the approximate method applicability of accounting for damping and its refinement on the basis of the initial approximation can serve as the correlation coefficients of waveforms.

It is shown that for non-proportional damping it is possible to approximate the decomposition of movements according to oscillations forms of non-damped system, if the forms are weakly correlated.

Key words: *cushioning, mode shapes, decomposition by forms, correlation of forms.*

Введение. В современных задачах сейсмостойкого строительства все чаще приходится сталкиваться с проблемой учета демпфирования. Для большинства строительных конструкций характерно различное демпфирование в их элементах. Например, для моста характерно затухание в демпферах подвижного состава, в металлических пролетных строениях, в опорных частях, железобетонных опорах и грунтах основания. Но, даже для обычных зданий надо, как минимум, учитывать рассеяние энергии в здании и грунтах основания.

Принципиальное значение имеет учет затухания при расчете систем сейсмоизоляции и сейсмогашения. Другой важной областью, где необходим учет демпфирования, является расчет динамического взаимодействия сооружения с основанием.

В этом случае в расчетную схему вводятся демпферы, которые поглощают энергию, равную энергии излучаемой на бесконечность упругими волнами. Однако действующие нормативы вообще не рассматривают вопросы учета демпфирования.

Постановка задачи. На практике наиболее часто возникает необходимость решения следующих задач:

1. Учет гистерезисного демпфирования (внутреннего трения) в материале сооружения и в грунтах основания.
2. Учет геометрического рассеяния энергии в основании за счет ее уноса от сооружения упругими волнами.
3. Учет рассеяния энергии в специальных демпфирующих устройствах.

Методы исследования. Вопросы учета внутреннего трения в материале достаточно хорошо изучены [1-4 и др.]. Наиболее просто учесть этот вид демпфирования с использованием гипотезы Е.С.Сорокина [2].

При этом используется обобщенная гипотеза Е.С. Сорокина о пропорциональности матриц демпфирования и жесткости элементов конструкции.

В этом случае, если задать вместо модуля упругости E_s s -го элемента соответствующее произведение $\gamma_s E_s$, то на выходе вместо матрицы жесткости $\mathbf{R}$ получим матрицу демпфирования по Сорокину $\mathbf{B}_c$. Уравнение движения по Сорокину представляется в комплексной форме и имеет вид:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}^* + (\mathbf{B}_c i + \mathbf{R})\dot{\mathbf{q}}^* = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}_0^* \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{B}_c$ – матрица гистерезисного демпфирования по Е.С.Сорокину; символом * обозначены комплексные значения обобщенных перемещений и возмущений [4], $\mathbf{M}$ – матрица инерции системы, $\mathbf{R}$ – матрица жесткости.

Хорошо известны недостатки уравнения (1), описанные в литературе [4-6]. Поэтому затухание по Е.С.Сорокину заменяют эквивалентным вязким [4].

$$\mathbf{B}_{\text{экв}} = \mathbf{B}_c \mathbf{X}^{-1} \mathbf{K} \mathbf{X} \quad (2)$$

где $\mathbf{X}$ – матрица собственных векторов недемпфированной системы (матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}$),

$\mathbf{K}^2 = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] = \mathbf{\Lambda}$ – диагональная матрица собственных чисел матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}$.

С использованием (2) получаем вещественную систему уравнений, эквивалентную (1):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}_{\text{экв}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{R}\mathbf{q} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}_0 \quad (3)$$

Для систем с пропорциональным демпфированием, т.е. в случае, когда матрица $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_c$ имеет ту же систему собственных векторов $\mathbf{X}$, что и матрица $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R}$, уравнения (1) и (3) раскладываются по формам колебаний:

$$\ddot{\xi}_j^* + (1 + \gamma_j i) k_j^2 \xi_j^* = p_j^* \quad (4)$$

$$\ddot{\xi}_j + \gamma_j k_j \dot{\xi}_j + k_j^2 \xi_j = p_j \quad (5)$$

Здесь $k_j = \sqrt{\lambda_j}$, $\gamma_j = \frac{\chi_j}{k_j^2}$, p_j – элемент вектора $\mathbf{X}^{-1}\ddot{\mathbf{Y}}_0$

χ_j – диагональные элементы матрицы $\mathbf{X}^{-1}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_c\mathbf{X} = \boldsymbol{\chi} = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n]$.

Эквивалентность уравнений (4) и (5) детально рассмотрена в литературе [3,7].

Если демпфирование не является пропорциональным, то в матрице $\mathbf{X}^{-1}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_c\mathbf{X}$ можно удерживать лишь диагональные элементы, считая $\mathbf{B} \approx [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n]$.

Тогда можно получить еще одно представление матрицы вязкого демпфирования, которое по построению является пропорциональным

$$\mathbf{B}_{np} = \mathbf{M}\mathbf{X}^{-1}\boldsymbol{\chi}\mathbf{X} = \mathbf{M}\mathbf{X}^{-1}\mathbf{G}\mathbf{K}\mathbf{X} \quad (6)$$

где $\mathbf{G} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]$ – матрица коэффициентов неупругого сопротивления по формам колебаний.

Таким образом, для построения матрицы гистерезисного демпфирования, учитывающей внутреннее трение в материале, базовым является использование обобщенной гипотезы Е.С. Сорокина, позволяющей построить матрицу $\mathbf{B}_c$ и переход к матрицам вязкого демпфирования по формулам (2) или (6).

Как показывают расчеты, при затухании в материале элементов $\gamma_s < 0.3$, что выполняется для обычных материалов и грунтов, использование приведенных формул дает близкие результаты [4].

Несколько сложнее обстоит дело с рассеянием энергии за счет ее геометрического излучения в грунты основания. Как показано в работах О.Я.Шехтер [8], В.А.Ильчева [9] и других специалистов, это рассеяние при вертикальных и сдвиговых колебаниях является частотно зависимым и удовлетворительно описывается классическим вязким демпфированием, т.е. может быть охарактеризовано коэффициентом вязкого демпфирования.

Что касается поворотных колебаний, то здесь зависимость от частоты оказывается более сложной [9], но в приемлемом диапазоне частот может рассматриваться как частотно независимое и описываться коэффициентом неупругого сопротивления сопротивлению [10]. В рамках МКЭ геометрическое рассеяние учитывается постановкой по контуру, учитываемой в расчете области основания демпфирующей (Лисмеровой, неотражающей или акустической) границы.

Во всех случаях матрица демпфирования оказывается непропорциональной и ее элементы приводят к затуханиям, значительно превосходящим величину 0,3. В результате формулы (2), (3) и (6) могут приводить к разным результатам. Ограниченная возможность применения формул (2), (3) и (6) характерна и при использовании специальных демпферов.

В современном сейсмостойком строительстве используются разнообразные демпферы вязкого и гистерезисного типа [11]. Часть из них непосредственно описывается вязким или гистерезисным демпфированием, однако для значительной части сила сопротивления считается нелинейной и описывается зависимостью. [11,12]

$$Q = -Q_0 |\dot{q}|^\alpha \text{sign}(\dot{q}) \quad (7)$$

где Q_0 и α - параметры демпфера.

В [12] показано, что с высокой точностью нелинейное демпфирование (7) можно представить в виде суммы вязкого и сухого трения (ДСТ)

$$Q = -Q_0 |\dot{q}|^\alpha \text{sign}(\dot{q}) \approx b_{\text{экс}} \dot{q} + F \text{sign}(\dot{q}) \quad (8)$$

С учетом представления (8) уравнение колебаний можно записать в следующей форме:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}_{\text{экс}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{R}\mathbf{q} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}_0 + \mathbf{Q}_{\text{тр}} \quad (9)$$

где $\mathbf{Q}_{\text{тр}}$ – вектор обобщенных сил, вызванных трением в открытых ДСТ и остаточными смещениями в закрытых ДСТ.

Для всех форм уравнений, учитывающих демпфирование (1,3,9), в том числе и для нелинейных уравнений (9) [13], актуальным является вопрос об их разложении по формам колебаний.

Если для внутреннего трения в материале допустимо приближенное разложение уравнений по формам колебаний недемпфированной системы вследствие относительно малых сил демпфирования, то для учета геометрического рассеяния энергии и при использовании специальных демпферов такое разложение не обосновано.

В связи с этим в практике строительных расчетов стали появляться методики и программные средства вычисления комплексных собственных чисел и векторов рассматриваемых систем.

Для точного учета демпфирования приходится работать с полными матрицами $\mathbf{A}$ систем (1) и (3), которые имеют вид

- Для систем (3,9)

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R} \\ \mathbf{E} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (10)$$

- Для системы (1)

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{R} + i\mathbf{B}_c) \\ \mathbf{E} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Существующие программные средства позволяют реализовать задачу о собственных значениях для комплексных матриц, однако в распространенных программных комплексах такого рода решения не предусматриваются. Исключение составляет ППП «Микрофе», включающее решение комплексной собственной проблемы [14].

Обсуждение результатов. Авторы настоящей статьи реализовали два метода определения комплексных собственных чисел и векторов для демпфированной системы.

Оба метода исходят из начального приближения собственных чисел λ и собственных векторов $\mathbf{x}$ для недемпфированной системы.

При этом начальное приближение комплексной матрицы собственных векторов записывается в виде

$$\mathbf{Z}^{(0)} = \left\| \mathbf{X} \cdot \left(-\frac{\mathbf{\Gamma} \cdot \mathbf{\Omega}}{2} + i\mathbf{\Omega}_* \right) \quad \mathbf{X} \cdot \left(-\frac{\mathbf{\Gamma} \cdot \mathbf{\Omega}}{2} - i\mathbf{\Omega}_* \right) \right\| \quad (12)$$

комплексной матрицы собственных чисел в виде

$$\Lambda = \left[-\frac{\gamma_1 \omega_1}{2}, -\frac{\gamma_2 \omega_2}{2}, \dots, -\frac{\gamma_n \omega_n}{2}, -\frac{\gamma_1 \omega_1}{2}, -\frac{\gamma_2 \omega_2}{2}, \dots, -\frac{\gamma_n \omega_n}{2} \right] + i \left[\omega_*^{(1)}, \omega_*^{(2)}, \dots, \omega_*^{(n)}, -\omega_*^{(1)}, -\omega_*^{(2)}, \dots, -\omega_*^{(n)} \right],$$

где $\omega_*^{(j)} = \omega_j \cdot \sqrt{1 - \frac{\gamma_j^2}{4}}$

(13)

Первый метод исходит из того, что приближение (8,9) имеет малую погрешность, которая итерационно уточняется. На i -ом этапе комплексное собственное число $\lambda_*^{(i)}$ и соответствующий ему собственный вектор $z^{(i)}$ записываются следующим образом

$$z^{(i+1)} = z^{(i)} + \Delta^{(i)} \quad \lambda_*^{(i+1)} = \lambda_*^{(i)} + \delta$$
(14)

При этом выполняется условие

$$A \cdot z^{(i+1)} = z^{(i+1)} \cdot \lambda_*^{(i+1)}$$
(15)

После подстановки (10) в (11) получим

$$(A - \lambda_*^{(i)} \cdot E) \cdot \Delta^{(i)} - z^{(i)} \cdot \delta = M p + \Delta^{(i)} \cdot \delta^{(i)}$$
(16)

где,

$$M p = A \cdot z^{(i)} - z^{(i)} \cdot \lambda_*^{(i)}$$
(17)

Если пренебречь в (12) малой величиной $\Delta \cdot \delta$, то получим систему n линейных уравнений с $n+1$ неизвестным $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ и δ .

Детальное описание алгоритма имеется в работе [15].

Второй подход использует известный метод Леверье.

В соответствии с ним для i -го собственного вектора выполняется условие:

$$z_i = \lim_{n \rightarrow \infty} (A^n z_i^{(0)})$$
(18)

Здесь $z_i^{(0)}$ - начальное приближение собственного вектора в соответствии с (8).

Авторы имеют большой опыт расчетов по предлагаемым методам для систем с разряженным спектром. В этом случае каждое начальное приближение по формуле (8) обеспечивает сходимость к соответствующему собственному вектору. Несколько хуже обстоит дело с системами, имеющими плотный спектр с точками его сгущения.

Такие задачи возникают при расчете сооружений совместно с грунтовым основанием, а также при расчете сложных пространственных систем.

Эмпирическим критерием применимости приближенного способа учета демпфирования и возможности его уточнения, исходя из начального приближения (8) могут служить коэффициенты корреляции форм колебаний ε_{ij} [16].

$$\varepsilon_{kj} = \frac{2\sqrt{\gamma_k \gamma_j k_k^3 k_j^3} \cdot (\gamma_k k_k + \gamma_j k_j)}{(k_k + k_j)^2 \cdot (k_k - k_j)^2 + k_k k_j [\gamma_k \gamma_j (k_k^2 + k_j^2) + k_k k_j (\gamma_k^2 + \gamma_j^2)]} \quad (19)$$

Если все коэффициенты корреляции не превосходят 0,2 вне зависимости от значений параметров демпфирования можно пренебречь его влиянием на формы колебаний.

Для иллюстрации изложенных теоретических соображений рассмотрим две характерные системы: динамический гаситель колебаний и жесткое сейсмоизолированное здание. Расчетная схема здания с ДГК показана на рис. 1а, а сейсмоизолированного здания на рис. 1б.

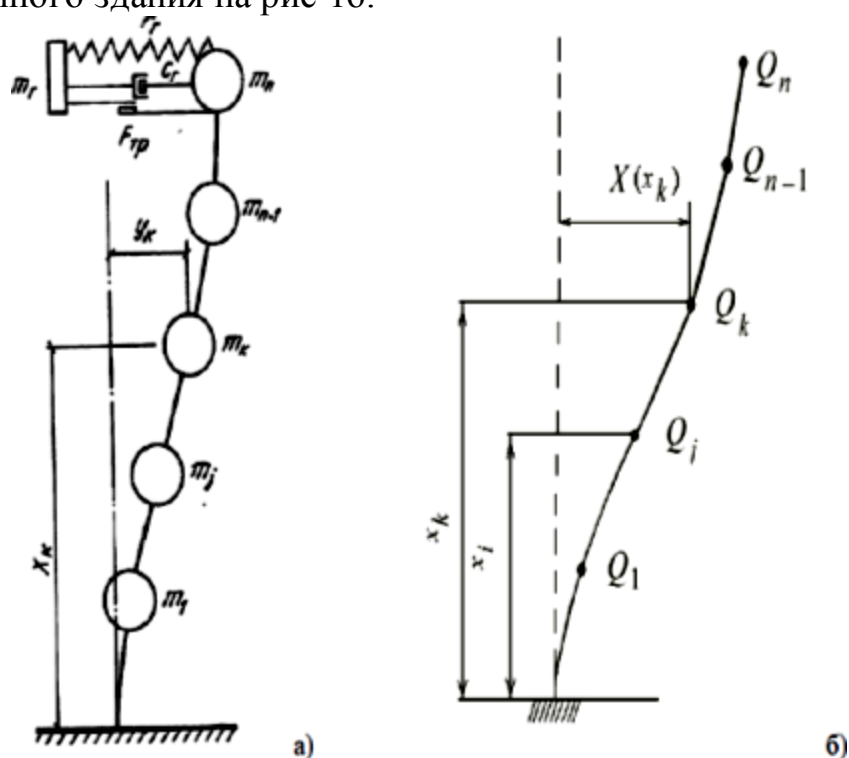


Рисунок 1. - Расчетная схема здания: с динамическим гасителем колебаний (а), жёсткое сейсмоизолированное здание (б)

Система с ДГК заимствована нами из работы [17]. Эта система не является оптимальной по настройке, но вполне позволяет судить о методах учета демпфирования. Собственные частоты колебаний системы достаточно близки и отличаются примерно на 27%.

Система с сейсмоизоляцией рассмотрена для пятиэтажного здания жесткой конструктивной системы с парциальным периодом $T_0=0,3$ с.

Период сейсмоизолированного здания превышает 3с. При этом собственные частоты достаточно далеки и отличаются примерно на 163%, т.е. спектр существенно разряжен.

Результаты расчета приведены в таблицах 1,2,3.

Таблица 1- Динамические характеристики системы с ДГК при затухании в пружине гасителя $\gamma=1$

Матрица демпфирования	Разложение по формам колебаний	Период		Коэффициент неупругого сопротивления		Коэффициент корреляции, ε_{kj}
		T_1	T_2	γ_1	γ_2	
$B_c = \begin{pmatrix} 4.386 \cdot 10^5 & -2.193 \cdot 10^5 \\ -2.193 \cdot 10^5 & 2.193 \cdot 10^5 \end{pmatrix}$	точное	0.27	0.322	0.841	0.188	0.729
	приближенное	0.256	0.351	0.62	0.48	0.751
$B_{eq} = \begin{pmatrix} 1.552 \cdot 10^4 & -9.826 \cdot 10^3 \\ -5.172 \cdot 10^3 & 1.034 \cdot 10^4 \end{pmatrix}$	точное	0.31	0.39	0.894	0.219	0.8
	приближенное	0.256	0.351	0.62	0.48	0.751
$B_{eq}^{(1)} = \begin{pmatrix} 6.206 \cdot 10^4 & -5.172 \cdot 10^3 \\ -5.172 \cdot 10^3 & 5.689 \cdot 10^3 \end{pmatrix}$	точное	0.256	0.351	0.62	0.48	0.751
	приближенное	0.256	0.351	0.62	0.48	0.751

Таблица 2- Динамические характеристики системы с ДГК при затухании в пружине гасителя $\gamma=0.3$

Матрица демпфирования	Разложение по формам колебаний	Период		Коэффициент неупругого сопротивления		Коэффициент корреляции, ε_{kj}
		T_1	T_2	γ_1	γ_2	
$B_c = \begin{pmatrix} 2.851 \cdot 10^5 & -6.58 \cdot 10^4 \\ -6.58 \cdot 10^4 & 6.58 \cdot 10^4 \end{pmatrix}$	точное	0.258	0.348	0.221	0.176	0.303
	приближенное	0.256	0.351	0.216	0.184	0.285
$B_{eq} = \begin{pmatrix} 1.19 \cdot 10^4 & -2.586 \cdot 10^3 \\ -1.552 \cdot 10^3 & 3.103 \cdot 10^4 \end{pmatrix}$	точное	0.258	0.348	0.217	0.184	0.308
	приближенное	0.256	0.351	0.216	0.184	0.285
$B_{eq}^{(1)} = \begin{pmatrix} 2.224 \cdot 10^4 & -1.552 \cdot 10^3 \\ -1.552 \cdot 10^3 & 2.069 \cdot 10^3 \end{pmatrix}$	точное	0.256	0.351	0.216	0.184	0.285
	приближенное	0.256	0.351	0.216	0.184	0.285

Таблица 3- Динамические характеристики системы с сейсмоизоляцией при затухании в сейсмоизоляции $\gamma=1$

Матрица демпфирования	Разложение по формам колебаний	Период		Коэффициент неупругого сопротивления		Коэффициент корреляции, ε_{kj}
		T_1	T_2	γ_1	γ_2	
$B_c = \begin{pmatrix} 1 \cdot 10^5 & -1 \cdot 10^5 \\ -1 \cdot 10^5 & 1.4 \cdot 10^5 \end{pmatrix}$	точное	3.145	0.313	0.982	0.109	$4.234 \cdot 10^{-3}$
	приближенное	3.157	0.313	0.991	0.109	$4.244 \cdot 10^{-3}$
$B_{eq} = \begin{pmatrix} 5.432 \cdot 10^3 & -4.527 \cdot 10^3 \\ -3.621 \cdot 10^3 & 1.539 \cdot 10^4 \end{pmatrix}$	точное	3.156	0.313	0.991	0.109	$4.236 \cdot 10^{-3}$
	приближенное	3.157	0.313	0.991	0.109	$4.244 \cdot 10^{-3}$
$B_{eq}^{(1)} = \begin{pmatrix} 1.04 \cdot 10^4 & -552.095 \\ -552.095 & 1.042 \cdot 10^4 \end{pmatrix}$	точное	3.157	0.313	0.991	0.109	$4.244 \cdot 10^{-3}$
	приближенное	3.157	0.313	0.991	0.109	$4.244 \cdot 10^{-3}$

Вывод. Результаты, приведенные в таблицах 1-3, наглядно показывают, что для систем с плотным спектром и большими коэффициентами корреляции форм колебаний приближенные методы учета демпфирования приемлемы, если затухания в системе не превосходит 0,3; для систем с разряженным спектром и с коэффициентом корреляции менее 0,3 использование приближенных методов учета демпфирования приемлемы.

Хотелось бы еще обратить внимание на следующие особенности.

Матрица эквивалентного вязкого демпфирования, полученная по формуле (2) не является симметричной, т.е. система содержит гироскопические члены. Это обстоятельство отмечено еще Л.М.Резниковым [7]. Погрешности в динамических характеристиках системы могут приводить к качественным ошибкам в оценке поведения системы, что иллюстрируется приведенными на рис.2 АЧХ системы с ДГК.

Предложенная в [17] модель учета демпфирования удобна в использовании, однако она не является консервативной, т.е. занижает амплитуду колебаний системы.

Библиографический список:

1. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Физматгиз, 1960. – 193 с.
2. Сорокин Е.С. К Теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. Госстройиздат, 1960 - 131 с.
3. Цейтлин А.И. Об учете внутреннего трения в нормативных документах по динамическому расчету сооружений// Строительная механика и расчет сооружений, 1981, N4, с.33-38
4. Долгая А.А., Индейкин А.В., Уздин А.М. Теория диссипативных систем. СПб, ПГУПС, 1999, 99с
5. Крендалл С. Роль демпфирования в теории колебаний. Периодический сборник переводов иностранных статей. Механика. 1971, №5 (129) с.3-22.

6. Меляховецкий А.С. Об одной гипотезе внутреннего трения при колебаниях упругих систем. Инж. Сборник, Том XXVI, 1958 с.216.
7. Резников А.М. Эквивалентная модель многомассовой системы с вязким и частотно-независимым внутренним трением. Строительная механика и расчет сооружений, 1979, №4, с.44-48
8. Шехтер О.Я. Об учете инерционных свойств грунта при расчете вертикальных вынужденных колебаний массивных фундаментов. - Труды НИИОСП, 1948, Вып.12, с. 72-89
9. Ильичев В.А. Динамическое взаимодействие сооружений с основанием и передача колебаний через грунт. В справочнике «Динамический расчет сооружений на специальные воздействия» М., Строймиздат, 1981, С.114-128.
10. Ван Хайбинь, Кузнецова И.О., Уздин А.М., Шермухамедов У.З. Использование упругого полупространства для моделирования оснований при оценке сейсмостойкости больших мостов. Вестник гражданских инженеров, №3(24), 2010 г. стр. 91-95.
11. Уздин А.М., Елизаров С.В., Белаш Т.А. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений. Учебное пособие. ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012-500 с.
12. Durseneva N.V., Indeykin A.V., Kuznetsova I.O., Uzdin A.M., Fedorova M.Yu. Peculiarities of Calculating Bridges with Seismic Isolation Including Spherical Bearings and Hydraulic Dampers in Russia. Journal of Civil Engineering and Architecture. Volume 9, Number 4? April, 2015, pp.401-409
13. Рутман Ю.Л. Обобщение метода главных координат на случай упругих систем с локальными нелинейностями. Сб. трудов V международной конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения». С.-Петербург, СПбГПУ, 2003, сс.457-464
14. Солдатов А.Ю., Лебедев В.Л., Семенов В.А. Учет демпфирования при расчетах сооружений на кинематические воздействия. VII Савиновские чтения, Тезисы докладов. ПГУПС, 2014, с.21-22
15. Щелкунов Д, Уздин А.М., Федоров А.А., Федорова М.Ю. Спектральное разложение при анализе сейсмостойкости демпфированных систем. Избранные труды междун. научн. Конференции по механике “VI Поляховские чтения” СПб, СПбГУ, 2012г, с.86-89
16. Петров А.А., Базилевский С.В. Учет взаимной корреляции между обобщенными координатами при определении сейсмических нагрузок. – Реф.инф. «Сейсмостойкое строительство (отечественный и зарубежный опыт)», серия XIV, ЦИНИС, М., 1978, вып.5, с.23-28.
17. Уздин А.М., Щелкунов Д.В. Об одном способе задания сил сопротивления в системах с неоднородным демпфированием. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2011. №2. С.47-50.

References:

1. Y.G Panovko Internal friction oscillations of elastic systems. M .: Fizmatgiz, 1960. - 193 p.
2. E.S Sorokin On the theory of internal friction the oscillations of elastic systems. Gosstroyizdat, 1960 - 131 p.
3. A .Zeitlin On account of the internal friction in the regulations for the dynamic calculation of structures // Building mechanics and calculation of constructions 1981, N4, pp.33-38
4. A.A. Long, A.V. Indeikin, A.M. Uzdin The theory of dissipative systems. St. Petersburg, PSTU, 1999, 99 p.
5. Crandall C. The role of damping in vibration theory. Periodic collection of translations of foreign articles. Mechanics. 1971, №5 (129) pp.3-22.
6. A.S Melyahovetsky hypothesis of internal friction at-tions oscillations of elastic systems. Ing. Collection, Volume XXVI, 1958 p.216.
7. A.M Reznikov Equivalent model multimass system with viscous and frequency-independent internal friction. Building mechanics and calculation of constructions 1979, №4, p. 44-48
8. O.J Schechter On account of the inertial properties of the soil in the calculation of ver-local-forced oscillations massive foundations. - Proceedings NIIOSP 1948, vol.12, pp.72-89.
9. V.A Il'ichev Dynamic interaction of structures with base and sending vibrations through the ground. The handbook "Dynamic calculation of structures for special effects" M. Stroyimzdat 1981, pp.114-128.
- 10.Wang Haibin, Kuznetsova IO AM Uzdin, Shermukhamedov UZ Using the elastic half-space for modeling the bases in the evaluation of seismic stability of large bridges. Bulletin of Civil Engineers, №3 (24), 2010, pp. 91-95.
- 11.A.M Uzdin, S.V Elizarov, T.A Belas Earthquake resistant design of buildings and structures of transport. Tutorial. FGOU "Training Center for Education in railway transport", pp. 2012-500.
- 12.N.V.Durseneva, A.V.Indeykin, I.O.Kuznetsova, A.M.Uzdin, M.Yu. Fedorova. Peculiarities of Calculating Bridges with Seismic Isolation Including Spherical Bearings and Hydraulic Dampers in Russia. Journal of Civil Engineering and Architecture. Volume 9, Number 4 April, 2015, pp.401-409.
- 13.JL Rutman The generalization of the method of principal coordinates in case of elastic systems with local nonlinearities. Coll. V works of the international conference "Scientific and technical problems of forecasting the reliability and durability of structures and methods of their solutions." St. Petersburg, STU, 2003, pp.457-464.
- 14.A.Y Soldatov, V.L Lebedev, V.A Semenov The account in calculating the damping facilities on the kinematic effects. VII Savinovskij reading abstracts. PSTU, 2014 pp. 21-22.

15. D. Schelkunov, A.M. Uzdin, A.A. Fedorov, M.Y. Fedorov The spectral decomposition in the analysis of seismic resistance damped systems. Selected works Internat. Scien. Conference on mechanics "Polyahovskie VI of reading" St. Petersburg, St. Petersburg State University, 2012, pp.86-89.
16. A.A. Petrov, S.V. Bazilevsky Accounting for cross-correlation between the generalized coordinates of the determination of seismic loads. - Ref.inf. "Earthquake-proof construction (domestic and foreign experience)," Series XIV, TsINIS, M., 1978, Issue 5, pp.23-28.
17. A.M. Uzdin, D.V. Schelkunov a method of setting the resistance forces in a non-uniform damping systems. Earthquake-proof construction. Security facilities. 2011. №2. pp.47-50.

УДК 656.11

Батманов Э.З., Гасанов Т.Г., Гусейнов М.Р.

ВЛИЯНИЕ ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЙ НА СНИЖЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН

E. S. Batmanov, T. H. Gasanov, G.M.Guseynov

THE IMPACT OF ROAD CONDITIONS ON THE SUSTAINABILITY DECLINE IN THE ROAD TRANSPORT IN THE REPUBLIC OF DAGESTAN

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические и экспериментальные исследования влияния различных компонентов дорожных условий на снижение устойчивости автотранспортного средства (АТС), приводящих к заносам и опрокидыванию. Приводятся расчетные формулы для определения критической скорости на поворотах с поперечными уклонами и резким изменением направления движения, при которых занос и опрокидывание уже не исключаются, в связи с появлением дополнительных поперечных сил инерции. Отмечается и даются пояснения, что существенное влияние на устойчивость автомобиля оказывает «боковой увод». Приводятся графики зависимостей поперечной силы от угла увода шин автомобиля и влияние износа протектора шин на сцепные качества при разных скоростях движения и величины шероховатости покрытия, полученные экспериментальным путем.

Отмечается влияние на занос и опрокидывание автомобиля неровностей дорожного покрытия. В таких дорожных условиях техническое состояние автомобиля и в частности его амортизаторов имеют существенное значение. Приводится график влияния амортизаторов на условия движения автомобиля,