



# МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 531:536

Л.А. СОСНОВСКИЙ, д-р техн. наук  
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПОСТРОЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ДВИЖЕНИЯ, ИНФОРМАЦИИ И ПОВРЕЖДЕНИЙ В МЕХАНОТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

*Показано, что движение порождает новую информацию в системе, если индекс ее поврежденности — ненулевой; информация оказывается положительной, когда система упрочняется, и отрицательной, когда она разупрочняется.*

**Ключевые слова:** движение, информация, повреждение, механотермодинамическая система, поврежденность

В работе [1] было показано, что процессы необратимого повреждения в механотермодинамической системе порождают трибофатическую энтропию. Это означает, что, с одной стороны, должна существовать связь между движением и повреждением. С другой стороны, представляется очевидным, что повреждение движущейся системы изменяет ее информационное состояние. Следовательно, возникает общая задача о поиске взаимосвязи:

$$Mot \Leftrightarrow Inf \Leftrightarrow Dam, \quad (1)$$

в которой *Mot* означает движение, *Inf* — информацию, а *Dam* — повреждение.

По имеющимся сведениям, подобная задача не ставилась ни в классической механике (см., например, [2]), ни в теории повреждаемости (см., например, [3]), ни в теории информации (см., например, [4]).

Будем конкретизировать задачу (1) последовательно.

Сначала найдем функцию взаимосвязи движения и информации, т.е.

$$Mot \Leftrightarrow Inf. \quad (2)$$

Примем функцию преобразования движения в виде [5]:

$$\dot{X} = F(t, X, U), \quad (3)$$

где  $U(t, X)$  — вектор-функция управления.

Дадим решение задачи (2) применительно к неуправляемым линейным стационарным динамическим системам. Для таких систем математическая модель (3) становится простейшей:

$$\dot{X} = BX, \quad (3a)$$

где матрица размерности  $n \times n$ :

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix},$$

след матрицы  $B$ :

$$tr B = b_{11} + b_{22} + \dots + b_{nn}.$$

Для системы (3a) функционал преобразования информации О.Т. Вавилова приводится к следующему выражению [5]:

$$\log_2 P(0, X(0)) - \log_2 P(T, X(T)) = k \int_0^T tr B dt, \quad (4)$$

где  $k = \ln 2$  — постоянная. При  $T = t$  имеем информационную функцию динамической системы:

$$\Delta I = I_2 - I_1 = -k \cdot tr B \cdot t. \quad (5)$$

Здесь размерность  $B$  должна быть такой, чтобы  $\Delta I$  определялось в единицах информации (битах).

Функция (5) характеризует, в соответствии с (2), изменение информации в простейшей динамической системе (3a) при ее переходе из одного состояния в другое; она и есть реализация (2) в простейшей постановке.

Теперь для того, чтобы конкретизировать (1), осталось исследовать повреждаемость системы во времени. Будем считать, что основные типы кинетических процессов повреждения  $\omega_{\Sigma t}$  объекта (твердого тела, силовой системы) можно описать степенным уравнением [6]:

$$\omega_{\Sigma t} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{T_{\infty}} \right)^h \right]^q, \quad (6)$$

где  $T_{\infty}$  — ресурс (долговечность);  $h \geq 1, q \geq 1$  — параметры. Если  $h \geq 1, q = 1$ , то преимущественными оказываются явления разупрочнения материала (выпуклая кривая на рисунке 1), а при  $q > 1, h = 1$  — напротив, явления упрочнения (вогнутая кривая на рисунке 1). При  $h = 1, q = 1$  система стабильна (пунктир на рисунке 1). В общем же случае при  $h > 1, q > 1$  процессы упрочнения — разупрочнения системы

определяются соотношением параметров  $h/q$  и описываются более сложными ( $S$ -образными) кривыми.

Для любого фиксированного момента времени  $t/T_0 = \text{const}$  введем единую характеристику систем — индекс повреждаемости:

$$\omega_j = \omega_{st} - \omega_{\Sigma t}, \quad (7)$$

где  $\omega_{\Sigma t} = \omega_h$  либо  $\omega_{\Sigma t} = \omega_q$  есть уровень повреждаемости реальной системы, а  $\omega_{st}$  — соответствующий ему уровень повреждения «идеальной» системы, для которой характерно линейное накопление повреждений (см. пункт на рисунке 1).

И тогда оказывается, что значения индекса повреждаемости (7) могут составлять три характерных класса:  $\omega_j > 0$ ;  $\omega_j < 0$  и  $\omega_j = 0$  (см. рисунок 1). Суммируя индекс повреждаемости, уравнение (5) можно продолжить так:

$$\Delta I(t) = -k \cdot \text{tr} B \cdot t = a_s \Sigma \omega_j(t), \quad (8)$$

где  $a_s$  — переходная функция. Ее вид пока не установлен, а содержательный смысл состоит в том, что она преобразует повреждения (6) в информационную функцию (5) посредством индекса (7). Нетрудно видеть, что уравнение (8) и есть простейшее решение задачи (1) применительно к линейной динамической системе (3а). Символическое представление (8) дано на рисунке 2.

На рисунках 3 и 4 дана графическая иллюстрация уравнений (8).

На рисунке 3 схематически представлены (в квадратных рамках) типичные графики движения системы (3а). Они построены в координатах  $x_1, x_2$  во времени; стрелки указывают направления движения. Весь набор временных диаграмм (на рисунке 3 их десять) размещен на общей плоскости, осью абсцисс для которой служит след матрицы  $B$ , а осью ординат — ее детерминант  $\det B$ . Нетрудно построить график функции  $\det B = (\text{tr} B)^2$ ; это — парабола на рисунке 3. И тогда временные диаграммы динамической системы второго порядка располагаются относительно данной параболы так, как показано на рисунке 3. Видно, что обнаруживаются четыре группы (1, 2, 3, 4) диаграмм, каждая из которых размещается в характерной

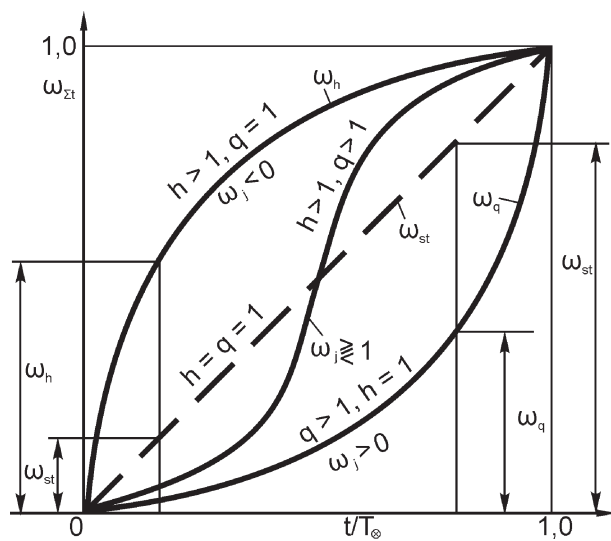


Рисунок 1 — Схемы возможных кинетических процессов необратимых повреждений

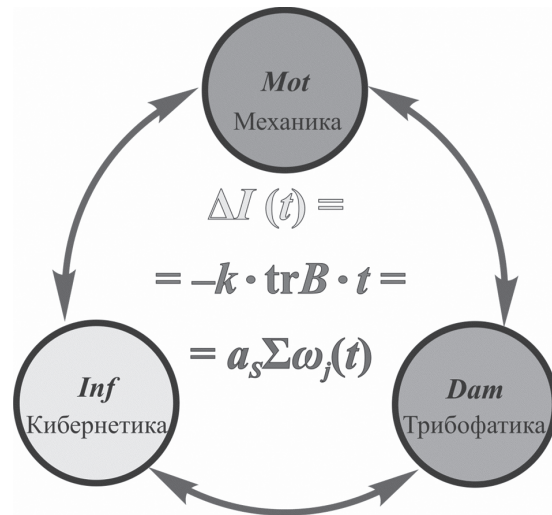


Рисунок 2 — Взаимосвязь движения, информации и повреждения

зоне плоскости, — в зависимости от соотношения и знаков  $\det B$  и  $\text{tr} B$ .

На аналогичном рисунке 4 временным диаграммам (см. рисунок 3) системы (3а) поставлены в соответствие графики информационной функции  $\Delta I(t)$  и функции накопления повреждаемости  $\Sigma \omega_j(t)$ . При этом на рисунке 4 сохранены те же обозначения 1, 2, 3 и 4 соответствующих групп данных, что и на рисунке 3.

Из совместного анализа данных, представленных на рисунках 3 и 4, следуют три общих заключения.

Во-первых, левой ветви параболы, построенной в координатах  $\det B - \text{tr} B$ , соответствуют устойчивые динамические процессы, которые порождают положительную линейную информационную функцию вследствие развития нелинейного упрочнения объекта.

Во-вторых, правой ветви параболы, построенной в координатах  $\det B - \text{tr} B$ , соответствуют неустойчивые динамические процессы, которые порождают отрицательную линейную информационную функцию вследствие развития нелинейного разупрочнения объекта.

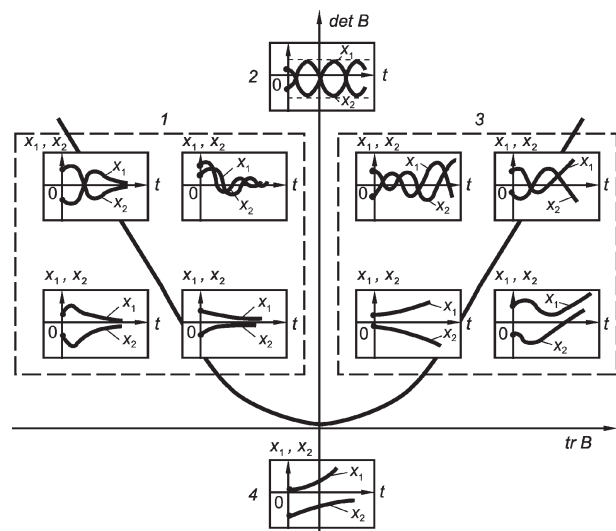


Рисунок 3 — Временные диаграммы динамической системы второго порядка: 1 — колебательные и асимптотически сходящиеся процессы; 2 — незатухающие колебательные процессы; 3 — колебательные и асимптотически расходящиеся процессы; 4 — неустойчивые процессы

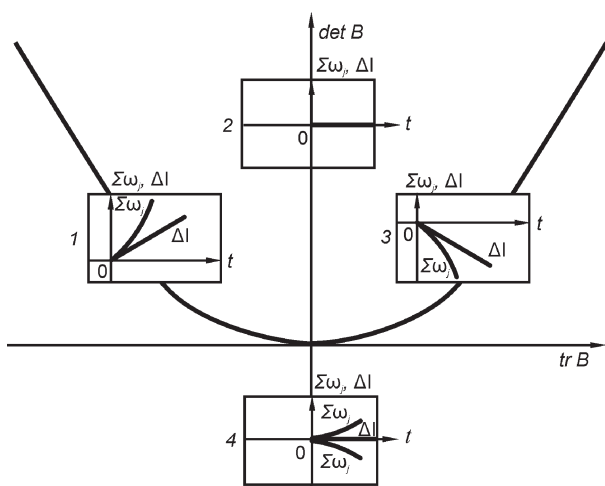


Рисунок 4 — Приращение информации и изменение индекса повреждаемости при движении системы

В-третьих, вершине параболы, построенной в координатах  $det B - tr B$ , могут соответствовать принципиально различные состояния системы: а) незатухающие колебательные процессы (выше вершины параболы — на оси  $det B$ ) — новая информация здесь не порождается, поскольку индекс повреждаемости  $\omega_j=0$ ; б) неустойчивые процессы (ниже вершины параболы — на той же оси  $det B$ ), когда снова обнаруживается нулевая информационная функция, а индекс повреждаемости  $\omega_j \geq 0$ . Чтобы разобраться с этим противоречием, надо искать некие специфические особенности данной неустойчивости, которые принципиально отличаются от неустойчивости колебательных и асимптотических расходящихся процессов.

Систематизируем основные имеющиеся в нашем распоряжении сведения о динамических системах второго порядка в таблице. И сделаем небольшое добавление: с энергетической точки зрения различают системы диссипативные и консервативные. Для диссипативных систем дивергенция  $div F(t, X, U) \neq 0$ . Для консервативных систем дивергенция  $div F(t, X, U) = 0$ .

Изучение таблицы позволяет ответить на поставленный выше вопрос: почему в результате некоего неустойчивого процесса не порождается никакой информации? Оказывается потому, что речь идет о консервативной системе, для которой дивергенция  $div F(t, X, U) = 0$  и  $\omega_j = 0$ . Следовательно, движение не порождает информацию, если дивергенция, и, следовательно, повреждаемость системы нулевые. Другими словами: консервативная система не способна производить новую информацию.

Сделаем одно замечание относительно развития процессов упрочнения-разупрочнения [7], которое следует из анализа уравнения (6) при  $q > 1, h > 1$  (см. S-образную кривую на рисунке 1). Существуют системы, в которых процесс разупрочнения во времени при действии заданной нагрузки не может самопроизвольно смениться процессом упрочнения; их называют разупрочняющимися. Всегда реализуется лишь обратное: самопроизвольное упрочнение сменяется во времени самопроизвольным же разупрочнением. Отсюда вытекает возможность и неизбежность достижения системой критического и за критических состояний — вплоть до ее разложения ( $\omega_\Sigma \rightarrow \infty$ ). Эта ситуация обсуждалась в работе [1].

Таким образом, возможно, что для некоторых систем существует запрет последовательности самопроизвольных процессов разупрочнение  $\rightarrow$  упрочнение или, другими словами, соблюдается правило их очередности: упрочнение  $\rightarrow$  разупрочнение. Если это так, то, принимая во внимание данные таблицы и уравнение (8), следует утверждать: диссипативная система, для которой  $div F(t, X, U) < 0$ , может со временем самопроизвольно перейти в неконсервативное состояние, для которого  $div F(t, X, U) > 0$ , но обратное невозможно. Все это означает: существует по крайней мере для разупрочняющихся систем, запрет последовательности преобразования во времени отрицательной информации в положительную; разрешенной является лишь последовательность преобразования положительной информации в отрицательную. Правило очередности, таким образом, соответствует представлению, согласно которому

Таблица — Взаимосвязь движения, информации, повреждаемости

Группа (см. рис. 1, 2)	Знаки		Процессы		Системы	Повреждаемость		Информационные функции
	$det B$	$tr B$	временные	физические		процессы	индекс	
1	+	-	Сходящиеся (колебательные и асимптотические)	Необратимые	Диссипативные, $div F(\bullet) < 0$	Упрочнения	$\omega_j > 0$	Линейная положительная
2	+	0	Колебательные незатухающие	Обратимые	Консервативные, $div F(\bullet) = 0$	Стабильные	$\omega_j = 0$	Нулевая
3	+	+	Расходящиеся (колебательные и асимптотические)	Необратимые	Неконсервативные (диссипативные), $div F(\bullet) > 0$	Разупрочнения	$\omega_j < 0$	Линейная отрицательная
4	-	0	Неустойчивые	Необратимые	Консервативные, $div F(\bullet) = 0$	Стабильные с флуктуациями упрочнения-разупрочнения	$\omega_j \geq 0$	Нулевая

любая система в конечном счете неизбежно погибает. В таком случае ее информационная функция должна стать «предельно отрицательной» или все же нулевой? Ответа на этот вопрос пока нет.

И еще одно замечание. Надо ясно осознавать, что самопроизвольное упрочнение-разупрочнение — это двуединая форма фундаментального процесса: повреждения во времени.

**Заключение.** На простейшем примере продемонстрирована взаимосвязь движения, информации и поврежденности (см. рисунки 3, 4 и таблицу). Ее анализ позволяет прийти к следующим основным выводам: движение порождает новую информацию в системе, если индекс ее повреждаемости — ненулевой; информация оказывается положительной, когда система упрочняется, и отрицательной, когда она разупрочняется.

#### Список литературы

1. Сосновский, Л.А. Об одном виде энтропии как мере поглощения энергии, расходуемой на производство повреждений в механотермодинамической системе / Л.А. Сосновский // Доклады НАН Беларуси. — 2007. — Т. 51, № 6. — С. 100—104.
2. Арнольд, В.И. Математические методы классической механики / В.И. Арнольд. — М.: УРСС, 2000. — 408 с.
3. Skrzypek, J. Modelling of Material damage and failure of structures / J. Skrzypek, A. Ganczarzski. — 2003. — 326 p.
4. Духин, А.А. Теория информации / А.А. Духин [и др.]. — М.: УРСС, 2007. — 248 с.
5. Сосновский, Л.А. Трибофатика: о диалектике жизни / Л.А. Сосновский. — 2-е изд. — Гомель: НПО ТРИБОФАТИКА, 1999. — 116 с.
6. Sosnovskiy, L.A. Tribo-Fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics). — Springer, 2004. — 424 p.
7. Сосновский, Л.А. Сюрпризы трибофатики / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков. — Гомель: БелГУТ, 2005. — 194 с.

---

Sosnovskiy L.A.

#### **About one method of creating interrelation between motion, damage and information in mechanothermodynamic system**

It is shown that motion generates new information in a system if its damage index is nonzero; information turns out to be positive when the system is strengthened and negative when it softens.

*Поступила в редакцию 17.03.2011.*