

ПРИРОДНЫЙ ФЕНОМЕН НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ

Анатолий Алексеевич Сперанский, вице-президент Российской инженерной академии по науке и технологиям, Директор Института наукоемких инженерных технологий РИА, руководитель рабочей группы "Технологическая безопасность" Экспертного совета Председателя Коллегии ВПК, научный руководитель компании Advanced Vector Analytics (EU), доктор экспертизы, профессор

*В мире не происходит ничего,
в чем не был бы максимум или минимум.
Леонард Эйлер*

1. ВВЕДЕНИЕ. ПРИРОДНЫЙ СИНТЕЗ И ЕГО АНАЛИЗ

Колебательные процессы объектов механических систем отражают напряженно-деформированные состояния (НДС), возникающие в результате внешних воздействий в виде сил, моментов сил или распределенных напряжений от них, либо внутренних силовых факторов в виде напряжений, приводящих к дефектам материала и/или детали конструкции. Результатом воздействий являются локальные смещения или деформации наблюдаемого объекта. Как воздействия, так и деформации имеют энергетическую природу, поэтому степень влияния воздействий на эксплуатационные свойства объекта принято оценивать через параметры вибрации, а в общем случае, через параметры колебаний разной формы: спектр упругих гармонических колебаний, удар, сложный упруго-пластический процесс и т.п. **Амплитудный анализ является простейшим и наиболее распространенным способом усредненной (приближенной) оценки НДС.** Традиции усредненных измерений диагностических параметров и статистической оценки состояний привели к тому, что действующие нормативы проектирования, изготовления и эксплуатации функционально ориентированных механических объектов (ФОМО) не опираются на фундаментальные законы механики и явно тормозят научно-технологическое развитие конструкторских и инженерных знаний.

Вместе с тем не вызывает сомнений, что колебания каждой точки наблюдаемого антропогенного объекта синтезируются в динамике по законам классической механики упругих сплошных сред (МУС). Движение наблюдаемых точек на каждой частоте анализируемого спектра частот происходит по годографу в форме эллиптической фазовой траектории. Суперпозиция спектра пространственных колебаний в любой измерительной точке отображается в виде букета разнонаправленных в пространстве траекторий. Эта всеобщая закономерность МУС относится как к напряжениям (математически описываются уравнениями Ламэ), так и к деформациям (описываются уравнениями Коши) и справедлива для каждой точки сплошной среды в полном спектре наблюдения.

Траекторный векторно-фазовый анализ состояний, основанный на достоверных измерениях пространственно-временных диагностических параметров, не исключает использование в задачах диагностики статистических наблюдений, но полностью исключает приближенные и усредненные методы при мониторинге и реконструкции текущих (мгновенных) фазовых состояний. Познание объективных законов механики состояний требует изучения в динамике тонких внутривидовых, связанных временем взаимодействий и закономерностей, уточняющих физику причинно-следственных процессов энергетических преобразований факторов воздействий в факторы реакции на эти воздействия. Для наглядности рассмотрим плоскую задачу энергетической трансформации НДС под влиянием элементарного нормального гармонического воздействия растяжения-сжатия.

В сплошных упругих средах нормальные напряжения (N) возникают вследствие **энергетических воздействий и трансформаций кинетической природы (Екин.)** и являются причиной последующих

пространственно-распределенных нормально-сдвиговых (N-T) смещений, приводящих к деформированию среды. Деформации, возникающие в результате объемных смещений, распределяются в структуре упругой среды "N-T"-состояний пространственно-временного "L-t"-континуума. Процесс сопротивления энергетическим воздействиям конструкционных материалов является **проявлением энергии упругого сопротивления материала потенциальной природы (Епот.)**.

Каждый траекторный процесс из рабочего спектра частот (или букета колебаний) имеет свою **пространственную причину** - напряжение и своё **пространственно ориентированное следствие** - деформацию. И весь этот набор попарно-связанных причинно-следственных диагностических параметров ФОМО через измеряемые 3D-компоненты системно связан фазой (или временем t) на любой интересной для наблюдения и диагностики частоте (f_i). Таким образом, путем измерения, реконструкции и анализа пространственно-временных (векторно-фазовых) диагностических 3D-параметров колебаний любой измерительной точки в виде букета 4D-годографов состояний, можно количественно оценивать степень "возмущенности" через суммарную энергию (E_{Σ}), пропорциональную площади годографа S_i на каждой наблюдаемой диагностической частоте f_i :

$$E_{\Sigma} = E_{fi} [E_{кин.}(f_i) + E_{пот.}(f_i)] \equiv E_{fi} \cdot S(f_i). \quad (1.1)$$

Суммарный показатель текущих мгновенных значений кинетической и потенциальной энергий в полном спектре значимых частот определяет интегральный уровень "возмущенности" или НДС объекта, который следует непрерывно оценивать с точки зрения опасности дальнейшей эксплуатации. **Опасные состояния порождают аварии и катастрофы, поэтому их надо уметь предвидеть и своевременно устранять.** В этом смысле процедур вибродиагностики и виброналадки (балансировки).

2. ФАКТОРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ПРОЧНОСТИ

Для достоверного наблюдения и эффективного анализа текущего ресурса конструкционной прочности деталей, узлов механизмов, силовых агрегатов, конструкций и сооружений ФОМО, необходимо обеспечить **адекватность диагностического мониторинга состояний процессам их природного синтеза.**

Одним из наиболее эффективных методов наблюдения процессов и явлений окружающего мира является принцип ЭОС - энергетической оценки состояний (Analytics Energy Health). В его основе всеобщее свойство механических систем, стремящихся к минимуму энергии в устойчивых (равновесных) гомеостатических состояниях. Математическим аппаратом исследования энергетических состояний (ЭС) является вариационное исчисление Эйлера-Лагранжа.

Принцип ЭОС является общепризнанным, однако, его практические приложения весьма ограничены метрологическими возможностями исследовательских проектов. Причина состоит в том, что функционирование механических систем на молекулярном уровне сопровождается внутривидовыми процессами тен-

зорного энергетического преобразования состояний, а инструментальных средств адекватного наблюдения и анализа природного синтеза механических систем до недавнего времени не существовало. Суть процесса энергетического преобразования заключается в следующем: внешнее (нормальное) силовое воздействие на материал конструкции вследствие всеобщего универсального свойства упругости трансформируется с определенной временной задержкой в сдвиговый процесс пространственных деформаций сопротивления. Как воздействие, так и реакция на него имеют энергетическую природу. Причина явления кроется в изменении кинетической энергии воздействия, а следствием является изменение потенциальной энергии сопротивления упругой среды. Изменение взаимодействующих энергий приводит к изменению равновесного состояния.

Одна из первых попыток создания динамической модели причинно-следственных отношений взаимодействия внешних силовых факторов с внутренним энергетическим состоянием материала ФОМО обобщена профессором А.П. Лещенко в виде Закона парности силовых факторов (ПСФ), который раскрывает по-новому смысл физических закономерностей трансформации напряженно-деформированных состояний и происходящих взаимодействий в процессе эксплуатации объекта. Закон опубликован в виде монографии "Фундаментальная строительная механика упругих систем" и зарегистрирован в качестве Европейского открытия № 006.

На основе открытий проф. А.П. Лещенко введен новый энергетический критерий оценки динамических состояний взаимодействующих элементов механических конструкций. Разработан универсальный системный подход к задачам строительной механики, позволяющий при наличии адекватной гомеостатической модели состояния объекта диагностировать на ранней стадии зарождение упруго-пластических патологий и прогнозировать момент вероятных разрушений конструкции.

Закон ПСФ раскрывает физические принципы влияния внешних силовых факторов на пространственное распределение внутренних напряжений и деформаций, реализующих энергетическую природу упругости конструкционных материалов через равновесие воздействий и упругой реакции на них. Внешние воздействия в виде сил и моментов, обладающие кинетической энергией $E_{кин}$, в соответствии с законами Ньютона объемно распределяются в виде массово-поверхностной потенциальной энергии $E_{пот}$ напряженного состояния внутренних сил, приводящих к смещениям и упругим деформациям в соответствии с Законом сохранения энергии и принципом Лагранжа-Кастильяно (рис. 1).

Порожденное изменением кинетической энергии внешнее

воздействие сил или моментов (либо аналогичный силовой фактор, например, дефект материала или конструкции) проявляется в сплошной среде в виде напряженного состояния (НС) пространственно распределенных внутренних сил и моментов. НС является причиной нормально-касательных 3D-смещений, образующих поле упругих деформаций - деформированное состояние (ДС). Взаимодействие внутренних распределенных силовых факторов и упругих деформаций приводит к изменению потенциальной энергии ($E_{пот}$), характеризующей измененное напряженно-деформированное состояние. Таким образом, состояние упругой системы определяется тремя реально ощутимыми факторами - внешними силами, внутренними объемными и поверхностными силами (напряжениями) и упругими деформациями. С этой позиции можно рассматривать простые и комбинированные состояния - ненапряженное, одноосное растяжения-сжатия, сдвига, изгиба и осевого кручения [1].

Связь между компонентами деформаций (ϵ, γ) и перемещениями (u, v, w) определяется уравнениями Коши:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \partial u / \partial x; \epsilon_y = \partial v / \partial y; \epsilon_z = \partial w / \partial z; \\ \gamma_{xyz} &= \partial u / \partial y + \partial v / \partial x + \partial w / \partial z \end{aligned} \quad (2.1)$$

и уравнением совместности деформаций Сен-Венана для плоской задачи:

$$\partial^2 \epsilon_x / \partial y^2 + \partial^2 \epsilon_y / \partial x^2 = \partial^2 \gamma_{xy} / \partial x \partial y. \quad (2.2)$$

Связь между компонентами деформаций и напряжений устанавливается законом Гука:

$$\epsilon_x = (\sigma_x - \mu \sigma_y) / E; \epsilon_y = (\sigma_y - \mu \sigma_x) / E; \gamma_{xy} = \tau_{xy} / G. \quad (2.3)$$

Исключение из рассмотрения внешнего силового фактора ведет к разрушению всей концепции упругой системы или, по выражению А.П. Лещенко, к физическому абсурду.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НДС

Реализованные в начале XXI века Научно-производственной компанией "РЭМ-вибро" инструментальные возможности векторно-фазовых (волновых) 3D-измерений диагностических параметров НДС позволили автору не только экспериментально подтвердить прикладную эффективность закона ПСФ, но и за пределами строительной механики упругих систем развить его до уровня фундаментального научного обоснования пространственно-временной последовательности причинно-следственных **Тензорных Энергетических Преобразований напряженных и деформированных молекулярных Состояний (ТЭПС)** для любых упругих тел в механике сплошных сред.

Для начала отметим чрезвычайно важное фундаментальное свойство природного синтеза в ФОМО: согласно Эйлеру, Лагранжу и Кастильяно, всякая **упругая система деформируется таким образом, что полная (интегрированная) энергия системы (E_{Σ}) достигает минимума**. Для решения прикладных задач прочности в теории упругости ими вместе с Бернулли, Лейбницем и Ньютоном разработан математический аппарат вариационного исчисления.

При деформировании упругого тела под действием внутренних, объемных и поверхностных сил компоненты его перемещений (u, v, w) в координатах (x, y, z) получают вариации в виде $\delta u(x, y, z), \delta v(x, y, z), \delta w(x, y, z)$. С изменением перемещений изменяются деформации и потенциальная энергия внутренних сил. Согласно принципу возможных перемещений, работа сил $\delta X, \delta Y, \delta Z, \delta X', \delta Y', \delta Z', \delta X'', \delta Y'', \delta Z'', \delta X''', \delta Y''', \delta Z''', \delta X''''$ бесконечно малых перемещениях $\delta u, \delta v, \delta w$ равна нулю. Запишем работу всех сил, действующих на упругое



Рис. 1 Системное взаимодействие энергетических факторов в МСС

тело на вариациях $\delta u, \delta v, \delta w$, и приравняем её нулю:

$$\iint_{\Omega} (X_v \delta u + Y_v \delta v + Z_v \delta w) d\Omega + \iiint_V (X \delta u + Y \delta v + Z \delta w) dx dy dz - \iiint_V (G_x \delta \epsilon_x + G_y \delta \epsilon_y + G_z \delta \epsilon_z + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz} + \tau_{yz} \delta \gamma_{yz}) dx dy dz = 0 \quad (3.1)$$

После стандартных преобразований получаем вариацию полной энергии:

$$\delta [E_{\text{пот.}} - \iint_{\Omega} (X_v u + Y_v v + Z_v w) d\Omega - \iiint_V (X u + Y v + Z w) dx dy dz] = 0 \quad (3.2)$$

Выражение в квадратных скобках представляет собой полную энергию упругой системы, из чего следует, что $\delta [E_{\text{пот.}} - E_{\text{кин.}}] = 0$. Равенство вариации нулю означает, что полная энергия E_{Σ} в состоянии равновесия упругой системы может равняться константе, в том числе, быть максимальной $E_{\Sigma \text{ max}}$ или минимальной $E_{\Sigma \text{ min}}$. Используя вторую вариацию полной энергии $\delta^2 E_{\Sigma}$, можно для равновесного состояния применить правило "дождя":

$$\begin{cases} \delta^2 E_{\Sigma} > 0 \text{ при } E_{\Sigma} = \min, \\ \delta^2 E_{\Sigma} < 0 \text{ при } E_{\Sigma} = \max, \\ \delta^2 E_{\Sigma} = 0 \text{ при } E_{\Sigma} = \text{const.} \end{cases} \quad (3.3)$$

Таким образом, для достоверного анализа текущих эксплуатационных состояний упругих систем перспективно применять вариационные методы в качестве эффективной вычислительной технологии в интеллектуальных системах волнового мониторинга состояний и экспертных кибернетических системах прогноза геомостаза.

В отличие от классического метода теории упругости, результаты которого имеют низкую сходимость с практическими результатами наблюдений, вариационный метод позволяет в анализе перейти от нелинейных бигармонических дифференциальных уравнений в частных производных к системе линейных дифференциальных уравнений.

4. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОСТОЯНИЙ

Помимо эффективного аппарата описания равновесных состояний упругих систем представляется полезным иметь углубленное понимание физики процесса ТЭПС.

При отсутствии нормального воздействия ($N = 0$) молекулярная структура упругого материала находится в свободном равновесном состоянии ($T = 0$) и изотропную структуру вещества можно условно представить в виде упорядоченного множества молекул правильной формы (например, шарообразных), полная энергия которых $E = E_{\text{кин}} = E_{\text{пот.}} = 0$. В случае постоянного статического нормального воздействия ($N = \text{const}$), как это характерно для силовых конструкций, шарообразные упругие молекулы деформируются, упруго сплющиваясь в направлении нормального воздействия ($N \neq 0$) и упруго расплющиваясь в ортогональной тангенциальной плоскости ($T \equiv M$) в соответствии с упругими свойствами материала. Энергия внешнего нормального воздействия и упругая реакция сопротивления на него уравниваются ($E_{\text{кин}} = E_{\text{пот.}} \neq 0$).

Рассмотрим наиболее вероятный причинно-следственный механизм в виде последовательной цепочки пространственно-временных элементарных энергетических преобразований в структуре упругого материала при нормальном гармоническом воздействии внешнего силового фактора $N(t)$, обладающего кинетической энергией $E_{\text{кин.}}$. В соответствии с основополагающим законом Гука возникает объемно распределенное нормальное НДС $\{\sigma_N(t_0), \epsilon_N(t_1)\}$ в процессе элементарного ТЭПС №1, которое в свою очередь, в соответствии с Законом Пуассона является причиной объемно-интегрированных сдвиговых тангенциальных смещений и деформаций $\gamma_T(t_2)$. С позиций векторно-фазовых наблюдений, основополагающие законы механики упругих систем представляют собой тензорно связанный пространством и временем единый Закон НДС Гука-Пуассона (рис. 2).

Объемно распределенная на микроструктурном уровне масса материала, вследствие свойства конечной скорости и инерционности упругого распространения механической волны, в про-

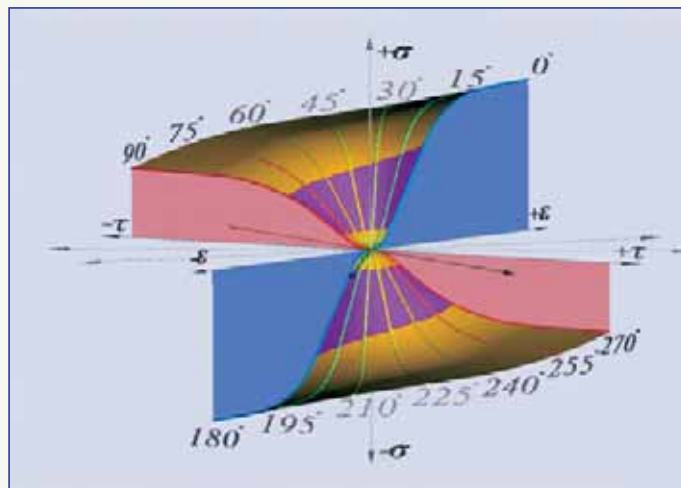


Рис. 2 Образ обобщенного закона НДС Гука-Пуассона

цессе элементарного ТЭПС №1 нормального деформирования упругого тела, приводит к временному запаздыванию ($t_1 - t_0 = \Delta t_1$) смещения δ_N или деформации $\epsilon_N(t_1)$ по отношению к породившей его причине - напряжению $\sigma_N(t_0)$.

Далее нормальная массово-распределенная упругая деформация $\epsilon_N(t_1)$ порождает сдвиговые объемно распределенные упругие напряжения сжатого (растянутого) тела $\tau_T(t_2)$ в процессе элементарного ТЭПС №2. Преобразование происходит в плоскости, ортогональной нормальному воздействию, с объемно распределенной потенциальной энергией и дополнительным временным запаздыванием ($t_2 - t_1 = \Delta t_2$).

Сдвиговые объемно распределенные напряжения $\tau_T(t_2)$ являются причиной сдвиговых объемных массовых запаздывающих смещений δ_T и приводит к сдвиговым деформациям $\gamma_T(t_3)$ в процессе элементарного ТЭПС №3. Сдвиговое преобразование обладает объемно распределенной потенциальной энергией с дополнительным временным запаздыванием ($t_3 - t_2 = \Delta t_3$). Запаздывания Δt_i отражают реальное временное запаздывание (сдвиг фазы) измеряемых компонентов векторных диагностических параметров и являются причиной эллиптической формы фазовых траекторий - пространственно ориентированных годографов и напряжений (эллипсы Ламэ) и деформаций (эллипсы Коши).

Образ обобщенного закона НДС Гука-Пуассона графически связывает линейную область закона Гука (нормальные деформации ϵ_N) с линейной областью закона Пуассона (сдвиговые деформации γ_T) в виде пространственной седлообразной области упругости. Нахождение диагностических параметров измерительных точек (ИТ) в указанной седлообразной области свидетельствует об исправном функционировании объекта в области расчетных упругих деформаций. Смещение диагностических параметров ИТ в сторону границы упругих и пластических деформаций обобщенного закона Гука-Пуассона свидетельствует о тренде снижения запаса эксплуатационного ресурса конструкционной прочности и может быть основой метода наблюдения текущих состояний и прогнозной диагностики опасных состояний.

Природный феномен описанного процесса состоит в пространственно-временном тензорном преобразовании кинетической энергии внешнего нормального воздействия в массово распределенную объемно-поверхностную потенциальную энергию сдвигового деформирования, реализующую природное свойство упругости в виде сопротивления текущей возмущенно-искаженной формы, стремящейся восстановить первоначальную геометрию. Процесс можно сравнить образно с прямым полуциклом сжатия пружины или упругого стержня (рис. 3).

В случае уменьшения величины или изменения направления внешнего нормального гармонического воздействия накопившаяся в массе упруго сжатого (условно, "бочкообразного") тела потенциальная энергия становится причиной восстановления исходной предшествующей воздействию формы. Процесс можно сравнить образно с встречным или обратным полуциклом распрямле-

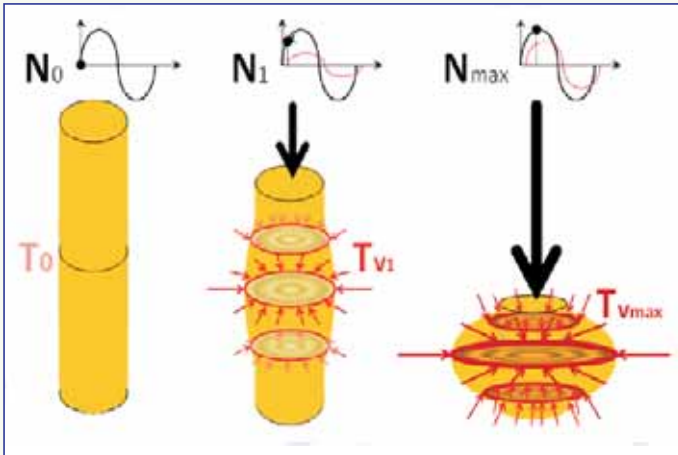


Рис. 3 Нормально-сдвиговые деформации в упругом сплошном стержне

ния пружины. Система приходит в состояние покоя или равновесия, либо продолжает периодически перекачивать энергию в соответствии с собственными свойствами и текущими параметрами внешнего гармонического воздействия $N(t)$.

Физическая модель энергетического преобразования состояний, адекватно отражающая (учитывающая) фундаментальные законы и закономерности природного синтеза состояний, позволяет создавать эффективные интеллектуальные системы наблюдения текущего гомеостаза и техногенеза (прогноза гомеостаза) механических объектов и систем любой степени антропогенной сложности.

5. КВАНТОВЫЙ ХАРАКТЕР ЗАРОЖДЕНИЯ ДЕФЕКТОВ

Природный феномен ТЭПС нормального воздействия (возмущения) в объемную пространственно-распределенную реакцию упругой среды представляет собой динамическое пространственно-временное фазовое гомеостатическое состояние (*Homeostasis*) подвижной последовательности мгновенных равновесий, сопровождающихся преобразованием энергии и её обменом с окружающей средой.

По аналогии с причинно-следственными процессами в биосфере (живые системы), описанный выше процесс механики упругих сред более века назад характеризуется выдающимся русским ученым в области системного анализа А.М.Ляпуновым как **гомеостаз техносферы** (неживых систем). По его прозорливому предвидению универсальным методом адекватного наблюдения и рационального управления объектами жизнедеятельности в биосфере и техносфере является текущая экспертиза гомеостатических состояний. Такой взгляд дает основание **именовать динамическим состоянием или гомеостатическим N-портретом рассматриваемый природный феномен взаимного тензорного преобразования потенциальной и кинетической энергии в упругих средах.**

В процессе периодического сжатия-растяжения и вызываемого им циклического знакопеременного локального сдвига внутри конструкционного материала происходит сплющивание упругой кристаллической решетки материала и взаимное упругое проникновение микрочастиц материала на атомарно-молекулярном уровне. Оба процесса могут быть причиной локальной анизотропии изначально изотропного материала. При определенных условиях или обстоятельствах ($N_{крит.}$) может произойти необратимый бифуркационный переход от упругого состояния к пластическому с нарушением кристаллической структуры материала. Образуется локальная зона зарождения микротрещины (желтая область) в дальнейшем расширяющегося дефекта материала изделия (рис. 4).

Наиболее распространенными (вероятными) причинами мгновенной скачкообразной деструкции материала могут быть: **а)** мгновенная пространственная концентрация НС, породившая энергетическое состояние "запредельной возмущенности", превосходящее критический физический предел упругого сопротивления материала ($E_{\Sigma}^*_{крит.}$), либо **б)** мгновенная пространственная кон-

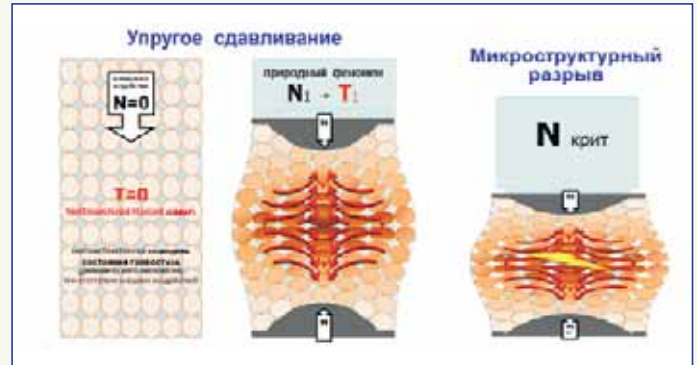


Рис. 4 Механизм сдвигового микроструктурного разрыва

центрация НС, совпавшая с локальным направлением анизотропной микропатологии конструкционного материала в виде производственного дефекта или образовавшегося в процессе эксплуатации ослабления конструкции ФОМО. Приведенные причины подвержены явно выраженному синергетическому эффекту.

Поэтому чрезвычайно важным является главное требование к метрологическим инструментам наблюдения - возможность достоверного и прецизионного измерения диагностических параметров мгновенных пространственных состояний.

Микроразрыв молекулярной структуры (микротрещина) под влиянием предельно-критических напряжений ($N_{крит.}$) делает материал локально анизотропным, что изменяет картину прохождения механических волн через область зарождающегося дефекта. Метрологический зафиксированный **факт квантованного события (ФКС)** влечет за собой скачкообразное изменение эллиптических параметров **N-портрета** - больших и малых полуосей эллипса, эйлеровых углов наклона плоскости эллипса относительно системы координат измерительной точки (ИТ), направление движения ИТ вдоль годографа, энергетических параметров и т.д. ФКС может быть диагностическим признаком или параметром для гиперчувствительных приемников в режиме механической локации, диагностического анализа или прогноза образования дефекта состояния на ранней стадии его появления и даже зарождения [2].

6. "L-I" - МОДЕЛЬ ЦИКЛА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ТЭПС

При стационарном гармоническом воздействии на упругий объект в каждом периодическом цикле ТЭПС происходит суммарное (общее) временное запаздывание в прямом ($\Delta t_{пр.} = t_3 - t_0$) и обратном $\Delta t_{обр.} = t_7 - t_4$) полуциклах преобразования напряженно-деформированного состояния:

- прямой полуцикл ТЭПС состоит из двух пар преобразований сжатия и сдвига (6.1):

\Rightarrow причина ($\sigma_{сж.}$) \Rightarrow следствие ($\epsilon_{сж.}$) \Uparrow причина ($\tau_{сдв.}$) \Uparrow следствие ($\gamma_{сдв.}$)
сжатие сжатие сдвиг сдвиг

- обратный полуцикл ТЭПС состоит из двух пар преобразований сдвига и растяжения (6.2):

\Downarrow причина ($\sigma_{сдв.}$) \Downarrow следствие ($\epsilon_{сдв.}$) \Rightarrow причина ($\tau_{раст.}$) \Rightarrow следствие ($\gamma_{раст.}$)
сдвиг сдвиг растяжение растяжение

Полный цикл ТЭПС гомеостаза может быть представлен в виде (6.3):

$\sigma_{Nсж.}/E_{кин.} \rightarrow \epsilon_{сж.}/E_{пот.} \rightarrow \tau_{сдв.}/E_{пот.} \rightarrow \gamma_{сдв.}/E_{пот.} \rightarrow \sigma_{сдв.}/E_{пот.} \rightarrow \epsilon_{сдв.}/E_{пот.} \rightarrow \tau_{раст.}/E_{пот.} \rightarrow \gamma_{раст.}/E_{пот.}$

Полный временной цикл НДС имеет вид (5.4):

$N(t) \Rightarrow \sigma_N(t_0) \Rightarrow \epsilon_N(t_1) \Uparrow \tau(t_2) \Uparrow \gamma(t_3) \Downarrow \sigma_T(t_4) \Downarrow \epsilon_T(t_5) \Leftarrow \tau_N(t_6) \Leftarrow \gamma_N(t_7)$
основная полуволна годографа обратная полуволна годографа

Временное запаздывание Δt является фазовой суммарной характеристикой процессов элементарных ТЭПС и определяется тензорной матрицей упруго-пластических механических свойств материала, а также взаимным расположением точки наблюдения реакции на воздействие и точки приложения



Рис. 5 Полный цикл элементарных ТЭПС

собственно воздействия (рис. 5).

"L-I"-системное исследование ТЭПС решает научные проблемы наблюдения и анализа: гармонического ряда (в том числе, производных) диагностических параметров колебаний более высокого порядка, нелинейных, вторичных, анизотропных, отраженных, интерференционных и иных виброакустических процессов.

7. СИСТЕМНОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ

Качественная картина плоской задачи пространственно-временного преобразования внешнего силового воздействия $N(t)$, расположенного в точке $O(t_0)$, показывает трансформацию эллиптических годографов упругих изотропных состояний $\{\sigma_N(t_i), \epsilon_N(t_i), \gamma_T(t_i)\}$ в функции расстояния и ракурса точки наблюдения относительно координат внешнего силового воздействия или конструкционного дефекта, образовавшегося в процессе эксплуатации (рис. 6).

Энергия волны гармонического воздействия $N_0(t)$ в точках

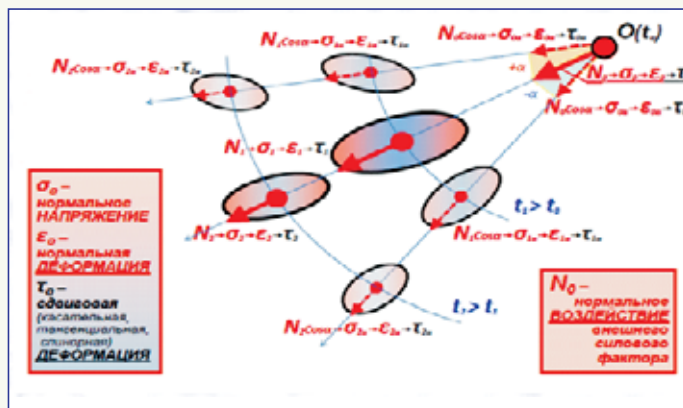


Рис. 6 ТЭПС волнового поля НДС упругих систем в точках наблюдения

наблюдения состояний (N_1, N_2 и т.д.) обратно пропорциональна их расстоянию до точки приложения внешнего силового воздействия и зависит от их ракурса относительно направления вектора воздействия. Траекторный годограф в плоскости ортогонально расположенных связанных нормальных $\epsilon_N(t_i)$ и касательных $\gamma_T(t_i)$ деформаций одинаковой частоты является простейшим случаем фигуры Лиссажу - эллипсом, форма и угол наклона большой оси которого определяется соотношением амплитуд гармонических колебаний и временным сдвигом (фазой) φ координатных компонентов. При отсутствии сдвига фаз годограф вырождается в наклонную прямую линию и при равенстве амплитуд наклон составляет 45° . При сдвиге фаз $\pm 90^\circ$ и равенстве амплитуд годограф вырождается в окружность. В остальных случаях годографы упругих колебаний имеют эллиптическую траекторию [3].

При пространственно-временной компьютерной реконструкции эллиптического годографа важно учитывать два чрезвычайно

важных обстоятельства:

- 1) направление движения текущей (мгновенной) точки годографа фазового вектора колебаний $\{\epsilon_N(t_i), \gamma_T(t_i)\}$ в каждой точке контурной поверхности строго детерминировано;
- 2) повсеместно распространенные в мировой практике 1D-моноскопические усредненные энергетически измерения диагностических параметров колебательных процессов:

$$СКЗ^* \epsilon_N(t_i) = \int \epsilon_N(t_i) dt = 0,7 \cdot \epsilon_{Nmax}$$

принципиально не совпадают ни с одной точкой реального годографа, отображающего пространственно-временное множество связанных компонентов текущих значений вектора (рис. 7), выдавая измеренное значение с ошибкой от 30 до 100 %, в зависимости от степени несовпадения направления в пространстве измеряемого параметра с направлением измерительной оси 1D-датчика при установке на объекте [4].

Описанный выше причинно-следственный механизм преобразования кинетической энергии внешних силовых факторов в массово распределенную потенциальную энергию НДС упругого сопротивления является всеобщим и универсальным для механики упругих сплошных сред.

К внешним силовым факторам, помимо сил и моментов внешних механических воздействий, по механизму влияния на гомеостатическое состояние можно отнести:

- локально образующиеся дефекты (например, вследствие потери усталостной прочности или значительных температурных деформаций и т.п.),
- спровоцированные внешними физическими процессами автоколебания в смежных средах (например, флаттерные или помпажные аэроупругие колебания),
- собственные полидинамические автоколебания резонансного типа, а также механические колебания, вызванные иными физическими полями (например, процессы энергетической трансформации в мультифизических системах) [5].

Изучая упругие системы следует ограничиться рассмотрени-

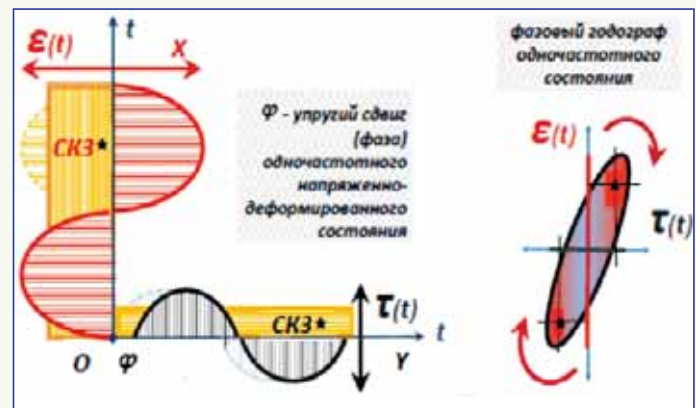


Рис. 7 СКЗ и фазовый портрет плоского одночастотного ТЭПС

ем процессов распространения волновых колебаний в сплошных средах. В этом случае локальное нарушение сплошности материала конструкции в форме неоднородности свойств или даже трещины на микроструктурном уровне свидетельствует о начале необратимого процесса зарождения потенциально опасного дефекта. Таким образом, инновационный факт изменения гомеостатического портрета может быть диагностическим признаком образования дефекта состояния на ранней стадии его зарождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан эффективный метод достоверной оценки текущих эксплуатационных состояний, которые во времени можно считать гомеостатическим портретом (Homeostasis portrate). П-портретирование, координатно привязанное к динамической модели объекта наблюдения, позволяет выстраивать самоорганизующиеся экспертные кибернетические системы техногенеза (Н-прогноза) [6].

Системная интеграция в рамках Модельного гомеостатического проектирования (МГП) инновационных подходов ВИТ-технологии, инструментальных средств ВМС, синтез-моделей ТЭПС, СНК-технологий и мобильных интеллектуальных экспертных систем обеспечат Н-портретированию **неоспоримое превосходство на рынке интеллектуальных систем экотехнологической безопасности** во всех сферах жизнедеятельности человека.

Кто раньше других освоит интеллектуальные экспертные сетевые технологии, тот может стать недосягаемым лидером на рынке систем экотехнологической безопасности во всех сферах жизнедеятельности человека.

Литература и публикации

1. Лещенко А.П. Фундаментальная строительная механика упругих систем. Изд. "Сфинкс", Таганрог, 2003, - 975 с.
2. Сперанский А.А. и др. Фундаментальный подход к реконструкции механических полей для оценки эксплуатационных

свойств изделий Оборонпрома, Двигатель, 2009, №1-3.

3. Гусев Б.В., Сперанский А.А. Волновой мониторинг безопасности механических систем, РИА, альманах ДСР, 2011, №3.
4. Цернант А.А., Сперанский и др. Системотехника вибромониторинга строительных конструкций, БСТ, 2009, №11, с. 49-61.
5. Сперанский А.А., Иванюк И.И. Стратегия научного мониторинга критически важных для национальной безопасности и потенциально опасных объектов. Изд. АНБ, 2010, №3.
6. Сперанский А.А. Гомеостатическое модельное проектирование как способ обеспечения техногенной безопасности при создании и эксплуатации объектов новой техники // Двигатель, 2013, №3.
2. Вайнберг И.А., Вайнберг Э.И., Цыганов С.Г., Сидорин В.Б. Российские высокоэнергетические томографы для отработки технологии и сертификации ответственных изделий авиационной промышленности // Двигатель. 2012. № 4. С.20-26.

ИНФОРМАЦИЯ

В мае 2015 года ГТЭС №1 месторождения нефти и газа "Приразломное" на базе шести газотурбинных установок ПТУ-4П разработки ОАО "Авиадвигатель" наработала 500 000 часов с начала эксплуатации.

Пермские установки эксплуатируются ООО "ЮНГ-Энергонефть" с 2001 года. ПТУ-4П работают в простом цикле, в качестве топлива используют попутный нефтяной газ, что позволяет компании-владельцу не сжигать его в факельных установках, а утилизировать на месте. Наряду с технико-экономическими преимуществами, применение пермского оборудования обеспечивает соблюдение жестких экологических норм.

Эксплуатация газотурбинных установок ПТУ-4П разработки ОАО "Авиадвигатель" началась в 1999 году. Всего за 16 лет заказчиком поставлено 39 установок. Их суммарная мощность на начало мая 2015 года составляет 156 МВт.

Установки используются в составе газотурбинных электростанций ГТЭС-4 и ГТЭС "Урал-4000". Работают как в простом, так и в когенерационном цикле, используя в качестве топлива природный или попутный нефтяной газ. Суммарная наработка ПТУ-4П на 01.05.2015 г. приближается к 1 880 000 часов. Нарботка лидерной машины превысила 97 тысяч часов.

Сегодня ПТУ-4П успешно эксплуатируются на объектах ООО "Башкирская генерирующая компания", ОАО "ЛУКОЙЛ", "Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд", ОАО "Газпром".



XIV МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2015
МЕЖДУНАРОДНЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ И КОНФЕРЕНЦИИ

24 – 27
НОЯБРЯ



Генеральный информационный партнер:
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ
Технический партнер:
RealMedia



ufi
Approved Event

ОРГАНИЗАТОР
Международный выставочный центр
ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:
Украинской Национальной Компании
"Укрстанкоинструмент"



Международный выставочный центр
Украина, 02660, Киев
Броварской пр-т, 15
М "Левобережная"
☎ (044) 201-11-65, 201-11-56
e-mail: lilia@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua
www.tech-expo.com.ua