

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ САМОЦЕНТРИРУЮЩИХСЯ СИСТЕМ

Годофредо Гевара Аланья, магистрант

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(Россия, г. Москва)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-11-4-36-42

**Аннотация.** В этой статье описываются теоретические принципы энергетического метода и его применение в самоцентрирующейся системе, которые являются частью зданий. Этот метод состоит из серии теорем и процедур, разработанных в XIX веке, основанных на концепции энергии упругой деформации и на принципе сохранения энергии. Применение этой методологии позволяет снизить ущерб зданий от сейсмических нагрузок.

Самоцентрирующиеся системы демонстрируют превосходные характеристики при землетрясениях с меньшими повреждениями и остаточными деформациями. Хотя процедура эквивалентного статического расчета на прочность является общепринятой для большинства конструктивных систем, применяемых в сейсмических условиях, кумулятивные повреждения и эффективная продолжительность землетрясений не могут быть учтены в явном виде, что существенно влияет на поведение и характеристики самоцентрирующихся систем после землетрясения. В последние десятилетия во всем мире все большее внимание уделяется теории проектирования на основе энергии (ТПОЭ), в которой потребность в энергии рассматривается как критический параметр для установления связи с повреждениями конструкций.

ТПОЭ может обеспечить всесторонний учет реакций и повреждений конструкции в процедурах проектирования, особенно для самоцентрирующихся систем. Однако лишь немногие исследования и реальные проекты энергетического проектирования посвящены использованию ТПОЭ для самоцентрирующихся систем.

В данной статье предполагается представить тщательный обзор нескольких важнейших вопросов, связанных с ТПОЭ. Между тем, в статье выявлены и обсуждены основные пробелы, которые нуждаются в дальнейшем изучении для применения ТПОЭ к самоцентрирующимся системам.

**Ключевые слова:** самоцентрирующиеся системы, землетрясение, энергетическая теория проектирования, теоретические принципы энергетического метода.

Хотя традиционные конструктивные системы могут быть спроектированы с низким риском обрушения при сильных землетрясениях, неустранимые неупругие деформации и повреждения привели бы к значительному простоя, затратам на ремонт, гибели людей и даже демонтажу после землетрясений. В последние десятилетия современное общество предъявило более высокие требования к эксплуатационным характеристикам - от предотвращения обрушений до устойчивости, в которых больше внимания уделяется ремонтнопригодности и функциональности конструкции после

сильного землетрясения. Концепция устойчивости была предложена в качестве перспективного направления в сейсмотехнике на совместной исследовательской конференции NEES/E-Defense [1]. Для удовлетворения повышенных сейсмических требований и обеспечения устойчивости к ним внедряются самоцентрирующиеся системы. По сравнению с традиционными системами самоцентрирующиеся конструкции демонстрируют лучшую управляемость повреждениями и сейсмические характеристики. Для обеспечения возможностей

самоцентрирования введен механизм предварительного напряжения, который значительно уменьшил бы остаточные деформации после землетрясения. Кроме того, режимы открывания-закрывания, возникающие в системах, могут защитить критически важные компоненты, такие как балки, колонны и стеновые панели, от серьезных повреждений, когда в зонах соединения будет ограничена только неупругая деформация. Были предложены различные самоцентрирующиеся системы наряду с процедурами проектирования, в то время как некоторые из них уже были применены в практических проектах.

Метод проектирования на основе прямого перемещения (ПОПП) обычно применяется для самоцентрирующихся систем [4]. Он использует максимальную деформацию в качестве основного расчетного показателя, гарантирующего прочность и способность к деформации при заданной интенсивности сейсмических воздействий. Хотя ПОПП может дать удовлетворительные результаты, в исследованиях отмечается, что кумулятивные и высокомоментные эффекты, которые оказывают существенное влияние на сейсмическое поведение и развитие повреждений в самоцентрирующихся системах, не могут быть учтены в ПОПП [4]. В этом случае разумно исследовать другие теории проектирования в направлении самоцентрирующихся систем, чтобы еще больше усовершенствовать их основы проектирования и продвигать приложения. Теория проектирования, основанная на энергии (ТПОЭ), которая соответствует концепции проектирования, основанной на производительности, сочетает методы проектирования, основанные на силе и перемещении, с учетом энергии землетрясения. Он вводит потребность в энергии в качестве критического параметра для установления взаимосвязи со структурными повреждениями, который привлек внимание всего мира с тех пор, как был предложен. Энергетическая концепция может

обеспечить всестороннее рассмотрение конструктивных реакций и повреждений при проектировании, особенно для самоцентрирующихся систем.

Было проведено множество исследований, посвященных вопросам, связанным с энергетикой, включая потребности в энергии и ее распределение в конструкциях. Для традиционных систем были предложены практические процедуры проектирования и оценки, основанные на энергетической концепции, хотя и ограниченные. Однако для широкого применения ТПОЭ по-прежнему требуются интенсивные исследования, особенно в самоцентрирующихся системах. В этой статье представлен репрезентативный обзор исследований по нескольким критическим вопросам, связанным с ТПОЭ. Между тем, обсуждаются основные пробелы, которые необходимо дополнительно изучить для его применения в самоцентрирующихся системах, чтобы дать перспективные представления.

#### **Основополагающий принцип ТПОЭ**

Энергетическая концепция была впервые обсуждена Хадсоном [5], а затем применена Хауснером [6, 7] в структурных сейсмических расчетах и оценках. Он указал, что структурные реакции связаны с преобразованием и рассеиванием энергии землетрясения, что будет отражаться в структурных повреждениях и деформациях. Система может быть защищена от серьезных повреждений и обладать достаточной сейсмостойкостью, если входная энергия землетрясения меньше, чем способность сооружений рассеивать энергию. Концепция энергетического баланса может обеспечить всестороннее понимание поведения конструкций, ответных реакций и развития повреждений при сейсмических воздействиях.

Концепция энергетического баланса может быть разработана на основе динамических уравнений систем с одной степенью свободы (ОСС), как показано в уравнении (1a,b).

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + c\dot{u} + f(u) = 0 \quad (1a)$$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f(u) = -m\ddot{u}_g \quad (1b)$$

где  $m$  – масса системы;  $c$  – индекс вязкого демпфирования системы;  $f(u)$  – восстанавливающая сила;  $u$ ,  $\dot{u}$  – и  $\ddot{u}$  – относительное перемещение, скорость и ускорение системы;  $\ddot{u}_g$  – ускорение поверхности земли. Путем интегрирования

уравнения (1a,b) с  $du$  от  $t = 0$  до  $t = t_d$ , где  $t_d$  представляет продолжительность землетрясений, уравнение энергетического баланса может быть получено следующим образом:

$$\int_{u(0)}^{u(t_d)} m\ddot{u}du + \int_{u(0)}^{u(t_d)} c\dot{u}du + \int_{u(0)}^{u(t_d)} f(u)du = - \int_{u(0)}^{u(t_d)} m\ddot{u}_g du \quad (2a)$$

$$E_K + E_D + E_f = E_I \quad (2b)$$

$$E_K + E_D + E_E + E_H = E_I \quad (2c)$$

где  $E_K$  представляет кинетическую энергию;  $E_D$  представляет энергию демпфирования;  $E_f$  представляет энергию деформации, которую можно разделить на энергию упругой деформации  $E_E$  и гистерезисную энергию  $E_H$ ;  $E_I$  представляет исходное сейсмическое воздействия энергии. Следует отметить, что  $E_K$  и  $E_E$  – это восстанавливаемая энергия, которая уменьшилась бы после прекращения вибрации систем.  $E_D$  и  $E_H$  – критические показатели, на которых ТПОЭ в основном сосредоточился.

Как правило, ТПОЭ направлена на обеспечение достаточных возможностей

рассеивания энергии для конструкций и компонентов по сравнению с сейсмическими требованиями (входная энергия) для предотвращения серьезных повреждений и обрушения систем. Рисунок 1 иллюстрирует основную концепцию ТПОЭ для упругих и неупругих систем.

Для упругих систем, поскольку  $E_H = 0$ , входная энергия  $E_I$  может рассеиваться только за счет собственного демпфирования, которое равно  $E_D$ . Таким образом, уравнение (3) должно выполняться, чтобы гарантировать сейсмические характеристики системы.

$$E_D \geq E_I \quad (3)$$

Что касается неупругих систем,  $E_H$  и  $E_D$  являются основными подходами к рассеиванию энергии при сейсмических воздействиях. Мощность рассеивания энергии должна превышать или равняться

требуемой входной энергии для обеспечения удовлетворительной сейсмической мощности, как показано в уравнении (4).

$$E_D + E_H \geq E_I \quad (4)$$

Следует отметить, что в уравнении (2a,b,c) для получения уравнения энергетического баланса используется относительное перемещение  $du$ , в то время как абсолютная форма уравнения может

быть получена путем интегрирования уравнения (2a) с абсолютным перемещением системы  $U_a$ , как показано в уравнении (5a, b).

$$\int_0^{t_d} m\ddot{u}_a \dot{u} dt + \int_0^{t_d} c\dot{u}^2 dt + \int_0^{t_d} f(u)\dot{u} dt = \int_0^{t_d} m\ddot{u}_a \dot{u}_g dt \quad (5a)$$

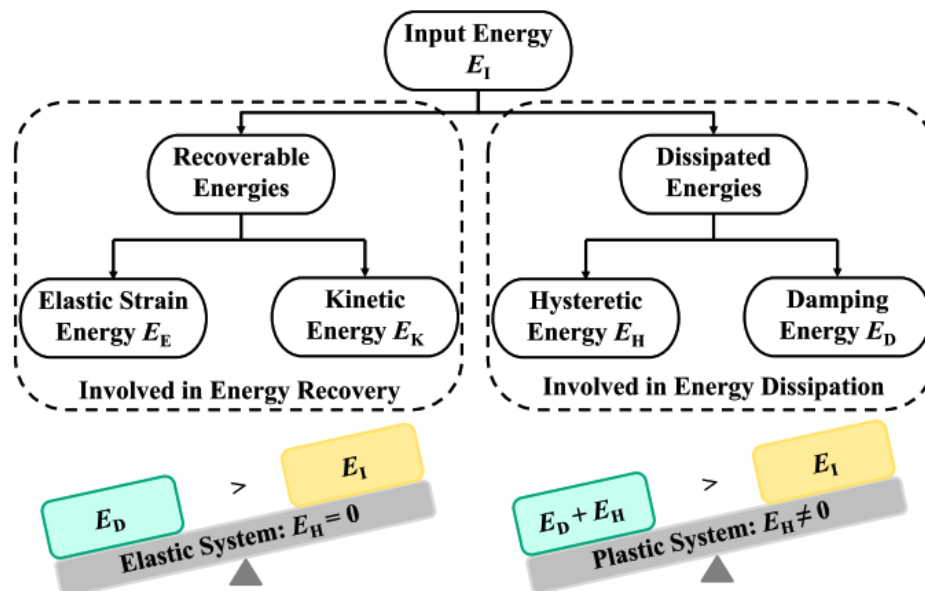


Fig. 1. Basic principle of EBDT.

$$E_{aK} + E_D + E_E + E_H = E_{aI} \quad (5b)$$

Таблица 1.

Input Energy	Входная энергия
Recoverable energies	Извлекаемая энергия
Elastic Strain Energy	Энергия упругой деформации
Kinetic Energy	Кинетическая энергия
Involved in Energy Recovery	Участие в восстановлении энергии
Elastic System	Упругая система
Dissipated Energies	Рассеянная энергия
Hysteretic Energy	Гистерезисная энергия
Damping Energy	Энергия демпфирования
Involved in Energy Dissipation	Участие в рассеивании энергии
Plastic System	Пластиковая система
Fig.1. Basic principle of EBDT	Рис.1. Основной принцип работы ТПОЭ

где  $E_{aK}$  и  $E_{aI}$  представляют абсолютную входную энергию и кинетическую энергию соответственно. Из уравнений (5a, b) и (2a, b, c) видно, что  $E_D$ ,  $E_E$  и  $E_H$  одинаковы в двух уравнениях, сбалансированных по энергии.

Многие исследования были сосредоточены на изучении различий в  $E_{aI}$  и  $E_I$ , а также применимости ТПОЭ. Бертеро и Уанг [8, 9] обнаружили, что разница между  $E_{aI}$  и  $E_I$  может быть очевидна для систем с очень короткими и длительными периодами, в то время как

абсолютное выражение уравнения энергетического баланса было бы более подходящим при определении потребностей в энергии. Это было одобрено другими исследователями и принято в относительных исследованиях [10-15]. С другой стороны, Чопра [16] и Бруно [17] считают, что относительный подход, полученный из относительной деформации, более значим в практическом применении, поскольку структурные реакции и повреждения напрямую связаны с нелинейными относительными деформациями. Чой и др. [18] пришли к выводу, что, поскольку гистерезисная потребность в энергии принята в качестве критического расчетного показателя в ТПОЭ и выводится из относительных деформаций, уравнение относительного энергетического баланса должно использоваться при сейсмических оценках и проектировании. Таким образом, во многих исследованиях при проектировании и оценке сейсморазведки использовалось относительное выражение уравнения энергетического баланса (уравнения 2a, b, c).

Несмотря на различные выражения концепции энергетического баланса,  $E_h$  вводится в качестве критического параметра для установления взаимосвязи с повреждениями конструкции и получения желаемой проектной прочности конструкции. Таким образом, ТПОЭ должна быть сосредоточена на определении потребностей в энергии и способности к рассеиванию энергии структурными компонентами и системами.

#### **Заключение**

Цель данной статьи – продвинуть применение ТПОЭ к самоцентрирующимся системам, предоставив тщательный исследовательский обзор связанных с ТПОЭ ключевых вопросов. Обсуждаются основные пробелы, которые нуждаются в дальнейшем изучении, чтобы предоставить исследователям перспективные взгляды.

Хотя подходы к проектированию, основанные на силе и перемещении, могут обеспечить удовлетворительные результаты для традиционных конструкций, все еще существуют ограничения в их применении к самоцентрирующимся системам. Было отмечено, что сейсмические особенности (частотный состав, эффекты длительности) и структурные характеристики, включая гистерезисное поведение, оказывают значительное влияние на проектирование пропускной способности не только традиционных систем, но и самоцентрирующихся систем.

Эти эффекты не рассматриваются в методах конвективного проектирования. Поскольку энергетическая концепция может обеспечить всестороннее описание структурных реакций, рассматривая весь сейсмический процесс, она должна сохранить ключевую информацию или сейсмические характеристики (содержание частоты, эффекты продолжительности) и рассмотреть их влияние на поведение конструкций.

Это привело бы к более разумным и точным результатам проектирования в соответствии с повышенными требованиями к производительности и отказоустойчивости.

С этой целью были проведены обширные исследования, посвященные ТПОЭ и связанным с ним ключевым вопросам, включая количественную оценку потребностей в энергии, распределение  $E_h$  и расчет мощности рассеивания энергии для систем и критически важных компонентов. Практические процедуры проектирования и оценки, основанные на энергетической концепции, хотя и ограниченные, были предложены для конкретных систем.

Следует отметить, что исследование ТПОЭ позволяет под другим углом взглянуть на структурный анализ и проектирование, а также дополнить основы структурного проектирования.

**Библиографический список**

1. Отчет о седьмом совместном совещании по планированию совместных исследований NEES/E-defense в области сейсмотехники. – Беркли: Калифорнийский университет в Беркли. 2010. PEER 2010/109.
2. Вада А., Ку З., Ито Г. Сейсмическая модернизация с использованием качающихся стен и стальных демпферов. В: Proc. Конференция ATC/SEI по улучшению сейсмических характеристик существующих зданий и других сооружений. – Сан-Франциско, Калифорния, США, 2009.
3. Стивенсон М., Паниан Л., Королик М. Бетонные стены и каркасы с последующим натяжением для обеспечения сейсмостойкости – тематическое исследование Центра Дэвида Брауэра // Материалы ежегодной конференции SEAOC, Гавайи, США, 2008.
4. Пристли М.Дж.Н. Проектирование зданий из сборного/предварительно напряженного железобетона на основе прямого перемещения // PCI Journal. – 2002. – №47 (6). – С. 66-79.
5. Хадсон Д. Методы определения спектра отклика в инженерной сейсмологии // Труды Всемирной конференции по сейсмотехнике. – Беркли, 1956.
6. Хауснер Г.В. Предельное проектирование сооружений для защиты от землетрясений // Материалы первой всемирной конференции по сейсмотехнике, Окленд, Калифорния, 1956.
7. Хауснер Г.У. Поведение конструкций во время землетрясений, Дж. Англ. Механика Div., Proc. Am. Soc. Гражданский англ., 85, EM4, 109-129, 1959.
8. Уанг С.М., Бертеро В.В. Использование энергии в качестве критерия проектирования при сейсмостойком проектировании // Центр инженерных исследований землетрясений Калифорнийского университета в Беркли, 1988. Том 88.
9. Уанг С.М., Бертеро В.В. Оценка сейсмической энергии в сооружениях // Проектирование землетрясений и динамика сооружений. – 1990. – №19(1). – С. 77-90.
10. Деканини Л.Д., Моллайоли Ф. Составление энергетических спектров упругих землетрясений // Сейсмотехника и динамика сооружений. – 1998. – №27(12). – С. 1503-1522.
11. Берг Г.В., Томайдес С.С. Потребление энергии сооружениями при сильных землетрясениях // Материалы второй всемирной конференции по сейсмотехнике. – 1960.
12. Гоэль С.К., Берг Г.В. Реакция высоких стальных каркасов на неупругие землетрясения // Журнал структурного подразделения. – 1968. – №94(8). – С. 1907-34.
13. Теран-Гилмор А. Параметрический подход к численному сейсмическому проектированию, основанному на характеристиках // Спектры землетрясений. – 1998. – № 14(3). – С. 501-20.
14. Чепмен М.С. Об использовании упругой входной энергии для анализа сейсмической опасности // Спектры землетрясений. – 1999. – № 15(4). – С. 607-635.

---

## ENERGY DESIGN THEORY: ON THE ISSUE OF THE USE OF SELF-CENTERING SYSTEMS

**Godofredo Guevara Alanya**, *Graduate Student*  
**National Research Moscow State University of Civil Engineering**  
**(Russia, Moscow)**

**Abstract.** *This article describes the theoretical principles of the energy method and its application in a self-centering system that are part of buildings. This method consists of a series of theorems and procedures developed in the 19th century, based on the concept of elastic deformation energy and on the principle of conservation of energy. The application of this methodology makes it possible to reduce the damage to buildings from seismic loads.*

*Self-centering systems demonstrate excellent earthquake performance with less damage and residual deformations. Although the procedure of equivalent static strength calculation is generally accepted for most structural systems used in seismic conditions, cumulative damage and the effective duration of earthquakes cannot be explicitly taken into account, which significantly affects the behavior and characteristics of self-centering systems after an earthquake. In recent decades, more and more attention has been paid worldwide to the theory of energy-based design (TPE), in which energy demand is considered as a critical parameter for establishing a connection with structural damage.*

*TPE can provide comprehensive consideration of reactions and structural damage in design procedures, especially for self-centering systems. However, only a few studies and real-world energy design projects are devoted to the use of TPE for self-centering systems.*

*This article is intended to provide a thorough overview of several important issues related to TPE. Meanwhile, the article identifies and discusses the main gaps that need further study for the application of TPE to self-centering systems.*

**Keywords:** *self-centering systems, earthquake, energy design theory, theoretical principles of the energy method.*