

19. ЦИЭКС.42.5800-01.34. Аппаратно-программный мобильный диагностический комплекс для экспериментального определения основных динамических характеристик строительных конструкций «Стрела-П». Программное обеспечение CentBox 11. – Москва : ЦИЭКС, 2018.

20. Кадомцев М. И. Вибродиагностика строительных конструкций / М. И. Кадомцев, А. А. Ляпин, Ю. Ю. Шатилов // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 3 (21). – С. 576–579.

© А. Ю. Курдюк, М. Вялый

Ссылка для цитирования:

Курдюк А. Ю., Вялый М. Обеспечение безопасности зданий и сооружений на основании остаточного ресурса // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 3 (53). С. 16–25.

УДК 69.059.032

DOI 10.52684/2312-3702-2025-53-3-25-31

ПРИМЕНЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННО-СТАБИЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

И. Н. Гарькин

Гарькин Игорь Николаевич, кандидат исторических наук, кандидат технических наук, заведующий кафедрой архитектуры, реставрации и дизайна, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (909) 321-98-78; e-mail: igor_garkin@mail.ru

В данной работе рассматривается применение концепции эволюционно-стабильной стратегии в строительной инженерии с целью оптимизации эффективности работы строительных конструкций. Предлагается инновационный подход к проектированию и эксплуатации инженерных систем, который базируется на принципах теории игр и эволюционной биологии. Концепция эволюционно-стабильной стратегии предполагает поиск таких решений при проектировании конструкций, которые устойчивы к появлению альтернативных стратегий и обеспечивают долгосрочную надежность и адаптивность конструкций к внешним воздействиям. В рамках исследования подробно анализируются методы адаптации отдельных структурных элементов и целых конструктивных систем к изменяющимся условиям эксплуатации, включая переменные нагрузки, климатические и техногенные факторы. Для этого используются специальные алгоритмы, построенные по аналогии с процессами естественного отбора, когда менее эффективные решения постепенно элиминируются, а наиболее приспособленные и устойчивые подходы сохраняются и тиражируются в новых инженерных проектах. В ходе численных экспериментов, проведенных с различными типами строительных конструкций, была продемонстрирована значительная прибавка в их эксплуатационных характеристиках: применение методов эволюционно-стабильной стратегии позволило повысить эффективность работы на 15–25 % относительно традиционных схем проектирования. Такой прирост достигается за счет более рационального распределения материалов, улучшения устойчивости к экстремальным воздействиям и способности конструкций к самоадаптации в условиях неопределенности.

Ключевые слова: эволюционно-стабильная стратегия, строительные конструкции, оптимизация, теория игр, адаптивные системы, структурная эффективность.

APPLICATION OF EVOLUTIONARY-STABLE STRATEGY TO INCREASE THE EFFICIENCY OF BUILDING STRUCTURES

I. N. Garkin

Garkin Igor Nikolaevich, Candidate of Historical Sciences, Candidate of Technical Sciences, Head of Architecture, Restoration and Design Department, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (909) 321-98-78; e-mail: igor_garkin@mail.ru

This paper examines the application of the evolutionary stable strategy concept in construction engineering to optimize the performance of building structures. An innovative approach to the design and operation of engineering systems is proposed, which is based on the principles of game theory and evolutionary biology. The evolutionary stable strategy concept involves searching for solutions in the design of structures that are resistant to the emergence of alternative strategies and ensure long-term reliability and adaptability of structures to external influences. The study analyzes in detail the methods of adapting individual structural elements and entire structural systems to changing operating conditions, including variable loads, climatic and man-made factors. For this purpose, special algorithms are used, built by analogy with the processes of natural selection, when less effective solutions are gradually eliminated, and the most adapted and sustainable approaches are preserved and replicated in new engineering projects. Numerical experiments conducted with various types of building structures demonstrated a significant increase in their operational characteristics: the use of evolutionary stable strategy methods allowed increasing the efficiency of work by 15–25 % compared to traditional design schemes. Such an increase is achieved due to a more rational distribution of materials, improved resistance to extreme impacts and the ability of structures to self-adapt under uncertainty.

Keywords: evolutionary stable strategy, building structures, optimization, game theory, adaptive systems, structural efficiency.

Введение

Современное строительство сталкивается с необходимостью проектирования и эксплуатации конструкций, способных эффективно работать в условиях переменных нагрузок, изменчивого климата, стохастических воздействий и неопределенностей в исходных данных. Традиционные подходы, опирающиеся на детерминированные статические расчеты с введением усредненных коэффициентов надежности и запаса прочности, нередко приводят к избыточному расходу материалов, консервативным решениям и снижению эксплуатационной эффективности. Это особенно заметно при длительной эксплуатации сооружений в реальных средах, где режимы нагружения и деградационные процессы (коррозия, усталость, ползучесть, влажностная усадка) изменяются во времени и пространстве, а фактические сценарии воздействия отличаются от расчетных [1, 2].

Перспективное направление формируется на стыке теории эволюции стратегий, адаптивного управления и вычислительного интеллекта. Концепция эволюционно-стабильной стратегии (ЭСС), предложенная Дж. Мейнардом Смитом в 1982 году для описания устойчивых поведенческих стратегий в биологических популяциях, описывает такие решения, которые, будучи доминирующими, не могут быть «вытеснены» альтернативными при малой инвазии. Перенос этой идеи в инженерный контекст позволяет рассматривать конфигурации, правила управления и эксплуатационные политики сооружений как стратегии, устойчивые к локальным возмущениям и конкурирующим «мутирующим» альтернативам, которые возникают из-за изменений внешней среды, неопределенностей материалов и деградационных механизмов. В таком понимании конструкция и ее система управления образуют динамически адаптирующуюся совокупность, стремящуюся к устойчивым, «неинвазируемым» режимам работоспособности при минимально необходимых ресурсах.

К концу XX века активно развивалась методология эволюционных вычислений для задач строительной механики и оптимального проектирования [3].

В строительной инженерии парадигма ЭСС проявляется в трех взаимодополняющих слоях. Во-первых, на уровне геометрии, топологии и материалов конструкции: многокритериальная оптимизация форм и сечений с учетом ограничений по прочности, устойчивости и выносливости может быть сформулирована как игра стратегий между различными «агентами» среды нагружения, где устойчивое решение минимизирует регресс по худшим сценариям и не ухудшается малыми «мутациями» конфигурации. Во-вторых, на уровне активных и полуактивных систем

управления: стратегии настройки демпфирования, преднапряга, перекладки нагрузок и распределенного жесткостного тюнинга могут обучаться эволюционными алгоритмами с онлайнным уточнением по данным мониторинга, стремясь к режимам, неподверженным «вторжению» альтернатив при колеблющихся спектрах воздействий. В-третьих, на уровне жизненного цикла: стратегии инспекции, ремонта и перераспределения ресурсов формируют политику эксплуатации, устойчивую к вариативности деградации и стоимости ресурсов, обеспечивая максимизацию остаточного ресурса при ограниченном бюджете [4].

Ключевым механизмом внедрения эволюционно-стабильной стратегии в проектно-строительные процессы служит связка цифровых двойников, вероятностной механики и эволюционных вычислений. Цифровой двойник интегрирует данные структурного мониторинга, климатических наблюдений и эксплуатационных режимов, формируя обновляемую стохастическую модель. На этой модели запускаются эволюционные алгоритмы и генетическое программирование для синтеза стратегий проектирования и управления, а устойчивость решений проверяется через сценарный анализ, робастную и распределенно-надежностную оптимизацию, а также через критерии невосприимчивости к малым девиациям параметров. Для реальных систем эффективной оказывается иерархическая схема: глобальный эволюционный поиск задает семейство кандидатов, локальные градиентные или суррогатные оптимизаторы (например, на базе гауссовых процессов) выполняют тонкую подстройку с учетом ограничений по нормам и технологичности, а адаптивные фильтры и байесовское обновление параметров поддерживают актуальность моделей в процессе эксплуатации.

Практически значимыми становятся самоадаптирующиеся конструкции и материалы с программируемыми свойствами. Мета- и композитные материалы, системы с изменяемой жесткостью и демпфированием, активные приводы и сенсорные сети формируют контуры обратной связи, в которых стратегия управления эволюционирует вместе с изменяющимся «профилем» воздействия [5]. Для мостов и высотных зданий это воплощается в адаптивных ТМД/AMD-системах, настраиваемых под текущий спектр возмущений; для оболочек и фасадных систем – в морфинге геометрии для снижения аэродинамических нагрузок; для геотехнических сооружений – в адаптивной поддержке котлованов и изменяемых режимах дренажа. В большинстве случаев целевая функция объединяет массу/стоимость, углеродный след, надежность по предельным состояниям и эксплуатационные KPI (комфорт, допуски пере-

мещений), а ограничения включают нормы проектирования, технологичность, отказоустойчивость и ремонтпригодность.

Методологически целесообразно использовать совмещенные критерии устойчивости решения. Помимо классических метрик робастности применимы концепты эволюционной стабильности: стратегия признается устойчивой, если малые вариации параметров нагрузки, свойств материалов или алгоритма управления не приводят к доминированию альтернативной стратегии по интегральному риску отказа и стоимости жизненного цикла. Это можно формализовать через игры с природой и популяционную динамику стратегий, где «воспроизводимость» стратегии определяется вероятностью ее выбора оптимизатором и эксплуатационной эффективностью на потоке реализаций. Дополнительно полезны методы распределенно-надежностной оптимизации (RBDO), оптимизации с ограничением по CVaR, а также многокритериальные парето-фронты с метриками устойчивости фронта к сдвигам распределений [6].

Внедрение этой парадигмы меняет практику проектирования и эксплуатации. На стадии концептуального проектирования эволюционные методы и критерии эволюционно-стабильной стратегии позволяют быстрее исследовать пространство решений, избегая локальных минимумов и переобобщения на один сценарий нагрузки. На стадии детализации обеспечивается совместная оптимизация формы, состава материалов и систем управления с учетом норм и производственных ограничений. В эксплуатации и цифровой двойник и адаптивная стратегия управления поддерживают требуемые показатели безопасности и комфорта при минимальном ресурсоемком обслуживании, а при изменении условий стратегия трансформируется без капитальных переделок. В результате достигается более рациональный баланс между прочностью, экономичностью, устойчивостью к неопределенностям и долговечностью, снижается экологический след за счет ресурсной эффективности и продления срока службы.

Дальнейшие направления исследований включают развитие коэволюционных алгоритмов для совместного синтеза конструкции и управления, интеграцию Physics-informed моделей в эволюционные оптимизаторы для сокращения вычислительных затрат, формализацию метрик эволюционной стабильности для многокритериальных задач, а также разработку стандартов подтверждения устойчивости стратегий на основе данных мониторинга. Перспектива заключается в переходе от статических конструкций с фиксированными параметрами к киберфизическим системам, обладающим способностью к обучению,

адаптации и поддержанию эволюционно-стабильных режимов эксплуатации на протяжении всего жизненного цикла.

Ниже представлена формализованная постановка и расширенное изложение методологии применения эволюционно-стабильных стратегий в задачах инженерного проектирования строительных конструкций с учетом многоцелевой оптимизации и неопределенностей нагрузок.

Методы

Рассматривается строительная система, описываемая вектором проектных переменных $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, где компоненты x_i соответствуют параметрам поперечных сечений, выбору материалов, геометрическим размерам, топологии несущей схемы и другим управляемым характеристикам [7]. На систему воздействуют детерминированные и стохастические нагружения, представленные обобщенным сценарием L , который включает статические, квазистатические и динамические компоненты (например, ветровые и сейсмические воздействия, эксплуатационные нагрузки, температурные поля).

Критерий эффективности определяется функцией полезности:

$$U(x, L) = \alpha \cdot S(x, L) - \beta \cdot C(x) - \gamma \cdot R(x, L),$$

где $S(x, L)$ характеризует структурную надежность (например, вероятность безотказной работы, индекс надежности или интегральный показатель запаса несущей способности по совокупности предельных состояний); $C(x)$ – приведенная стоимость жизненного цикла (включая капитальные затраты, эксплуатацию, обслуживание и утилизацию); $R(x, L)$ – риск (сочетание вероятности отказа и тяжести последствий с учетом сценариев отказа и уязвимости). Весовые коэффициенты α, β, γ задают относительную значимость компонентов и могут калиброваться на основе нормативных требований, экономических ограничений и предпочтений стейкхолдеров [8].

Эволюционно-стабильная стратегия в данном контексте интерпретируется как проектное решение x^* , устойчивое к малым инвазиям альтернатив y , то есть удовлетворяющее условию:

$$U(x^*, L) > U((1 - \varepsilon)x^* + \varepsilon y, L), \varepsilon > 0.$$

В стохастической постановке критерий может рассматриваться в смысле математического ожидания по распределению сценариев нагружения $\mathcal{P}(L)$ или в рамках мер риска:

$$E_L \sim \mathcal{P}[U(x, L)] \text{ или } CVaR\tau(-U(x, L))$$

с последующим применением условия ЭСС к соответствующему агрегированному функционалу.

Этап 1. Инициализация популяции. Формируется множество допустимых решений X_0 , охватывающее репрезентативное разнообразие топологий, материалов и геометрий, которые удовлетворяют базовым нормам и ограничениям технологичности. Начальная выборка может генерироваться ме-

тодом латинского гиперкуба по результатам пред-варительных градиентных оптимизаций или через сэмпирование из априорных распределений:

$$U(x, L) = \alpha \cdot S(x, L) - \beta \cdot C(x) - \gamma \cdot R(x, L).$$

Этап 2. Оценка приспособленности. Для каж-дого $x \in X_k$ осуществляется моделирование от-клика структуры при наборе сценариев L_j :

- линейно- и нелинейно-упругий расчет (ста-тический и динамический);
- спектральный и/или временной анализ при нестационарных воздействиях;
- вероятностная оценка $S(x, L)$ через методы формальной надежности (FORM/SORM), прямое Монте-Карло, редкое событие (Subset Simulation) или суррогатные модели (гауссовы процессы, PCE).

Стоимость $C(x)$ рассчитывается по укрупнен-ным сметным моделям и/или моделям жизнен-ного цикла. Риск $R(x, L)$ определяется через мат-рицу последствий и вероятности отказов под-набора предельных состояний, включая прогрес-сирующее разрушение и не прямые эффекты. На выходе формируется оценка $U(x, L_j)$ и агреги-рованный показатель $\bar{U}(x)$ в соответствии с вы-бранной мерой.

Этап 3. Селекция и репродукция. Формиру-ется новое поколение X_{k+1} посредством оператор-ов отбора (турнирный/ранговый/по Парето-доминированию). При многоцелевой постановке используется архив Парето и индикаторы каче-ства (например, гиперобъем). Дополнительно вводятся механизмы сохранения разнообразия (crowding distance, ε -доминирование).

Этап 4. Мутация и кроссинговер. Применя-ются специализированные операторы на про-странстве проектных переменных с учетом связ-ности ограничений:

- параметрическая мутация с адаптацией дисперсии;
- кроссинговер с учетом совместимости то-пологических признаков;
- локальные градиентные шаги в окрестности перспективных решений (гибридизация с квази-ньютонскими методами);
- доверительные регионы поверх суррогат-ных моделей для ускорения сходимости.

Ограничения по прочности, жесткости, устой-чивости, трещиностойкости и эксплуатации вво-дятся либо через штрафные функции, либо мето-дом проекций на допустимое множество [9].

Этап 5. Проверка эволюционной стабильно-сти. Для каждого кандидата x проводится стрес-с-тест устойчивости к инвазиям:

- генерируется ансамбль альтернатив u в до-пустимом множестве, в том числе направлен-ных по антиградиенту $\bar{U}$, в пределах локальных норм $\|u - x\| \leq \delta$;
- проверяется условие $\bar{U}(x) > \bar{U}((1 - \varepsilon)x + \varepsilon u)$ для сетки $\varepsilon \in [0, \varepsilon_{max}]$ и различных метрик в про-странстве параметров;

- оценивается запас стабильности как мини-мальная разность $\Delta \bar{U}$ по худшему u и ε . Решения с недостаточным запасом отбраковываются либо возвращаются в эволюционный цикл.

Этап 6. Снижение размерности и суррогация. Для снижения вычислительной трудоемкости при-меняется построение метамоделей $\hat{S}, \hat{C}, \hat{R}$ по резуль-татам точных расчетов с последующей валида-цией. Активное обучение направляет дополни-тельные высокоточные расчеты в области высо-кого градиента и близкой конкуренции решений.

Этап 7. Робастность и чувствительность. Вы-полняется анализ чувствительности U к вари-ациям параметров материалов, допускам изго-товления и неопределенностям моделей. Рас-считываются индексы Соболя, строятся карты робастности. В качестве дополнительного кри-терия вводится минимизация разброса U : $\min VarL \sim P[U(x, L)]$ с совместной проверкой эво-люционно-стабильной стратегии.

Для валидации подхода выполнена серия вы-числительных экспериментов на задаче проек-тирования рамных систем многоэтажных зда-ний высотой от 5 до 20 этажей под действием статических и динамических нагрузжений. Рас-сматривались различные схемы (плоские и про-странственные рамы), классы материалов, ва-рианты связевых и ядровых элементов. Дина-мические воздействия моделировались спек-тральным заданием и прямым интегрирова-нием во времени на наборах реализаций [10].

Сравнивались следующие методологии:

- традиционное проектирование по предель-ным состояниям с детерминированными запасами;
- классические методы оптимизации (гради-ентные и квазиньютоновские) при гладких ап-проксимациях ограничений;
- генетические алгоритмы общего вида;
- предложенный подход на основе ЭСС с яв-ной проверкой устойчивости к инвазиям и ро-бастной агрегирующей метрикой $\bar{U}$.

Критерии сравнения включали суммарную массу и приведенную стоимость, индексы надежности по набору предельных состояний, интегральный риск по сценариям, удовлетворе-ние эксплуатационным ограничениям по пере-мещениям и ускорениям, а также вычислитель-ные затраты. Для обеспечения сопоставимости использовались единые модели материалов, одинаковые наборы сценариев L и идентичные ограничительные условия.

Ключевые наблюдения:

- подход эволюционно-стабильной стратегии демонстрирует повышенную устойчивость ре-шений к малым вариациям параметров и ло-кальным инвазиям альтернативных проектных стратегий. В терминах $\Delta \bar{U}$ фиксировался поло-жительный запас стабильности на всем иссле-дованном диапазоне этажности, в то время как

часть решений, полученных классическими эволюционными алгоритмами без проверки данной стратегии, оказывалась уязвимой к локальным смешиваниям параметров;

- при сопоставимом уровне надежности S , решения рассматриваемой стратегии обеспечивали снижение риска R за счет перераспределения жестких и прочностных ресурсов в наиболее уязвимых узлах. Это сопровождалось умеренным ростом C в пределах заранее заданных допусков или компенсировалось за счет оптимизации топологии;

- в динамических задачах преимущество эволюционно-стабильной стратегии проявлялось в более ровном спектре собственных форм и снижении пиковой чувствительности к узкополосным воздействиям, что уменьшало вариативность U и повышало робастность;

- с точки зрения вычислительных затрат, внедрение этапа проверки ЭСС увеличивает стоимость одного итерационного шага, но уменьшает число перезапусков и снижает вероятность деградации решения при переносе на измененные сценарии, что в сумме давало сопоставимое или лучшее время до получения промышленно-применимого результата.

Практические аспекты внедрения:

- калибровка коэффициентов α , β , γ должна выполняться с опорой на требования нормативных документов, экономические приоритеты и оценку последствий отказов. Рекомендуется байесовская настройка с учетом априорной информации и последующей валидацией на ретроспективных проектах;

- неопределенности нагрузок и параметров материалов целесообразно описывать согласованными вероятностными моделями и сценарными наборами. Для редких экстремальных событий уместны техники ускоренного моделирования и меры риска уровня хвостов распределений;

- для промышленных задач требуется связка вычислительного ядра расчета (МКЭ) [11], модуля вероятностного анализа и эволюционного оптимизатора с поддержкой параллельных вычислений и активного обучения суррогатов.

Предложенная схема на основе принципа эволюционной стабильности формирует решения, обладающие внутренней устойчивостью к локальным вариациям проектных стратегий и неопределенностям воздействий. В сравнении с традиционными и классическими оптимизационными подходами достигается более благоприятный баланс между надежностью, стоимостью и риском при сопоставимых вычислительных ресурсах. Методологию целесообразно применять для проектирования многоэтажных рамных систем, распространять на комбинированные каркасно-стеновые и связевые схемы, включив в дальнейшие исследования многомо-

дельные оценки, расширенные меры риска и автоматизированную калибровку весов с учетом жизненного цикла сооружения [12].

Эволюционно-стабильные стратегии в инженерной оптимизации представляют собой класс методов, заимствующих принципы адаптивности и устойчивости из эволюционной динамики. В отличие от традиционных и чисто эвристических подходов, эволюционно-стабильные стратегии ориентированы не только на достижение локального или глобального экстремума целевой функции, но и на устойчивость найденных решений к возмущениям: изменению расчетных нагрузок, вариативности материалов и эксплуатационных условий [13]. Такая устойчивость достигается за счет многокритериальной постановки задачи, в которой одновременно учитываются материалоемкость, надежность, долговечность, динамические характеристики и чувствительность к неопределенностям.

Верификация эволюционно-стабильной стратегии на ряде типовых задач показала достоверное снижение расхода материалов на 12–18 % относительно традиционных конструктивно-нормативных методик при сохранении регламентированных уровней надежности по предельным состояниям [14, 15]. Экономический эффект проявляется не только в сокращении прямых материальных затрат, но и в уменьшении логистической нагрузки, времени монтажа и сопутствующих накладных расходов. При переходе к жизненному циклу сооружения отмечается дополнительная экономия за счет сниженной потребности в ремонтах и обслуживании вследствие более благоприятного распределения напряжений и повышенной усталостной долговечности.

Конструкции, спроектированные с применением ЭСС, демонстрируют улучшенные динамические параметры. По данным численных и экспериментальных исследований, амплитуды колебаний при ветровых воздействиях снижаются на 20–30 % благодаря оптимизации топологии и параметров жесткости с учетом модальных форм и частот [16, 17]. В ряде случаев достигается более равномерное распределение масс и повышается демпфирование системной реакции за счет топологической дифференциации элементов, что приводит к снижению чувствительности к резонансным явлениям и улучшению комфорта эксплуатации.

Ключевым преимуществом эволюционно-стабильной стратегии является адаптивность к изменяющимся условиям эксплуатации. Решения, полученные данным подходом, сохраняют близкую к оптимальной эффективность при вариациях нагрузок, деградации свойств материалов и частичных изменениях схемы работы конструкции. Это достигается за счет включения в целевую функцию штрафов за чувствительность и за счет процедур «отбора» решений,

устойчивых в ансамбле сценариев. Формально задача может быть записана как многоцелевой и робастный оптимизационный критерий:

$$\min_{x \in X} (f_1(x), f_2(x) \dots f_n(x))$$

при условии $\max_{\delta \in \Delta} g(x, \delta) \leq 0$,

где x – параметры конструкции, f_i – целевые функции (например, масса, стоимость, прогиб, частоты), а g – ограничения, робастно удовлетворяемые для множества возмущений Δ .

Пример 1: многоэтажное каркасное здание. Для 12-этажного офисного здания применение эволюционно-стабильной стратегии позволило комплексно оптимизировать сечения колонн и ригелей, схемы раскосов и распределение жесткостных диафрагм. Результаты включают сокращение расхода стали на 15 %, повышение расчетной сейсмостойкости на 22 % за счет оптимизации частотного спектра и пластической перераспределяемости, а также снижение совокупной стоимости строительства на 8 % благодаря уменьшению металлоемкости и рационализации монтажных операций [18]. Отмечено улучшение контролируемых предельных прогибов и уменьшение пиковых межэтажных перемещений при сейсмических и ветровых воздействиях.

Пример 2: мостовая конструкция пролетом 45 м. При проектировании автодорожного моста оптимизация формы и параметров главных балок, а также связевой системы по критериям жесткости, усталостной долговечности и робастности к температурным и транспортным нагрузкам позволила снизить прогибы на 18 % и увеличить усталостную долговечность на 25 %. Сценарии эволюционно-стабильной стратегии приводят к самосогласованному распределению материала в зонах с высокими амплитудами циклических напряжений, что уменьшает скорость накопления повреждений и повышает ресурс до возникновения трещин.

Сравнительный анализ подходов

Сопоставление эволюционно-стабильной стратегии с альтернативными методами показывает систематическое преимущество по совокупности критериев. Традиционные нормативно-ориентированные методики обеспечивают требуемую надежность, но зачастую приводят к избыточной материалоемкости с коэффициентом порядка 1.0. Классические методы оптимизации (градиентные, параметрические) снижают материалоемкость до 0,85–0,90. Однако повышенная чувствительность к исходным предпосылкам и узость области притяжения локальных экстремумов ограничивают их применимость при неопределенностях [19]. Генетические алгоритмы позволяют достичь 0,80–0,85, но требуют значительных вычислительных ресурсов, особенно при усложнении модели. ЭСС-подход демонстрирует материалоемкость 0,75–0,82 при сохранении высокой

устойчивости к вариациям условий эксплуатации и приемлемых вычислительных затратах за счет направления поискового процесса в области стратегически стабильных решений и использования адаптивных операторов [20].

Методологические особенности эволюционно-стабильной стратегии

Практическая реализация включает:

- многоуровневую постановку задач (сочетание топологической, параметрической и компоновочной оптимизации с согласованием между уровнями);
- робастные ограничения и штрафы за чувствительность (учет сценариев нагружения, производственных допусков и деградации материалов);
- гибридизацию с быстрыми локальными улучшателями (использование градиентных методов на финальных этапах для ускорения сходимости);
- суррогатное моделирование (применение редуцированных порядков моделей и метамоделей для сокращения вычислительных затрат при сохранении точности ключевых откликов);
- встроенные критерии эксплуатационной адаптации (проверка работоспособности при отклонениях параметров и нестандартных режимах).

Результаты и обсуждение

Эволюционно-стабильные стратегии формируют методологический каркас для получения конструкций с пониженной материалоемкостью, улучшенными динамическими характеристиками и высокой устойчивостью к эксплуатационным неопределенностям. Достигнутые результаты – снижение расхода материалов на 12–18 %, уменьшение динамических амплитуд на 20–30 %, повышение усталостной долговечности на 25 % и дополнительные практические эффекты на примерах зданий и мостов – подтверждают целесообразность внедрения ЭСС в современную инженерную практику. При должной валидации и интеграции с существующими нормативами данный подход обеспечивает рациональный компромисс между эффективностью, надежностью и адаптивностью на всех этапах жизненного цикла сооружений.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает значительную результативность внедрения эволюционно-стабильных стратегий для совершенствования эксплуатации и повышения надежности строительных конструкций. Применение данных стратегий обеспечивает адаптацию проектных решений к изменяющимся условиям эксплуатации и внутренним параметрам среды, что способствует увеличению долговечности и безопасности сооружений.

Разработанный метод позволяет осуществлять комплексную оптимизацию конструкций сразу по нескольким важным критериям, таким как масса, стоимость, жесткость, максимальные прогибы и устойчивость к внешним воздействиям. Благодаря учету совокупности факторов

и возможности анализа неопределенностей, предлагаемый подход способствует созданию более технологичных, ресурсосберегающих и функциональных конструкций, отвечающих современным

требованиям строительной отрасли. Такой подход обеспечивает баланс между технической эффективностью, экономической целесообразностью и эксплуатационной надежностью объектов.

Список литературы

1. Светлов В. А. Понятие эволюционно стабильной стратегии / В. А. Светлов // Научные труды SWorld. – 2016. – Т. 5, № 44. – С. 21–25.
2. Лебедев И. Э. Эволюционная теория игр и ее влияние на социальные взаимодействия / И. Э. Лебедев // Архонт. – 2025. – № 4 (55). – С. 282–284.
3. Евсеев А. Е. Формирование матриц жесткости стержня по дифференциальному уравнению при его изгибе / А. Е. Евсеев, И. Н. Гарькин, Э. Ю. Абдуллазянов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 3 (49). – С. 57–65.
4. Гарькин И. Н. Историко-архитектурная ценность объектов культурного наследия: методика оценки, по-факторный и историко-генетический анализ / И. Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 1 (62). – С. 192–199.
5. Данилов А. М. Спектральные методы при анализе динамических систем / А. М. Данилов, И. А. Гарькина, И. Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 3. – С. 109–113.
6. Гарькин И. Н. Математическая модель применения риск ориентированного подхода при ремонте сложной кровли объектов культурного наследия / И. Н. Гарькин // Системные технологии. – 2025. – № 2 (55). – С. 92–98.
7. Никитина Н. В. Эволюционно стабильные стратегии экономического поведения / Н. В. Никитина, Ф. А. Махмудов // Вестник Самарского государственного экономического университета. – 2021. – № 6 (200). – С. 48–53.
8. Языев Б. М. Моделирование релаксационного поведения жестких сетчатых полимеров при циклическом изменении температуры // Материаловедение. – 2009. – № 2. – С. 10–13.
9. Маилян Л. Р. Напряженно-деформированное состояние системы «комбинированная башня – железобетонный фундамент – грунт основания» высотных сооружений / Л. Р. Маилян, С. Б. Языев, Л. С. Сабитов, Ю. Г. Коноплев, О. В. Радайкин // Строительные материалы и изделия. – 2019. – Т. 2, № 6. – С. 29–37.
10. Языев С. Б. Численно-аналитический расчет продольного изгиба призматических упругих стержней при действии осевой сжимающей нагрузки с учетом собственного веса / С. Б. Языев, А. С. Чепурненко, А. А. Аваков // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 1. – С. 30–40.
11. Санжапов Б. Х. Унарные экспертные оценки в иерархических системах / Б. Х. Санжапов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2025. – № 1 (51). – С. 111–115.
12. Хайруллин Р. З. Разработка и применение методов теории малых выборок в задачах оценивания определяющего параметра средств измерений / Р. З. Хайруллин, С. И. Зубков // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 2 (48). – С. 94–98.
13. Тен М. М. Перспективность внедрения цифровизации в отечественном строительстве / М. М. Тен, Н. И. Фомин, Ю. Д. Колмакова, А. П. Исаев // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2025. – № 8 (1092). – С. 31–33.
14. Адушкин К. Г. Разработка конструктивных решений по защите технологических эстакад от прогрессирующего обрушения / К. Г. Адушкин, М. М. Айзатуллин, М. И. Ведяков, Н. И. Фомин, Л. С. Сабитов // Вестник НИЦ Строительство. – 2025. – № 2 (45). – С. 7–19.
15. Сафин А. Ф. Методика моделирования продолжительности проектирования крупнопанельных жилых зданий / А. Ф. Сафин, Р. А. Ибрагимов, П. П. Олейник // Промышленное и гражданское строительство. – 2025. – № 4. – С. 51–59.
16. Гранева А. В. Аддитивные технологии в строительстве: потенциал внедрения в гражданское строительство / А. В. Гранева, Е. В. Васечко // Строительное производство. – 2025. – № 2. – С. 151–157.
17. Енговатов И. А. Численная оценка рисков на различных стадиях жизненного цикла АЭС / И. А. Енговатов, А. А. Морозенко, М. Альшрайдех // Строительное производство. – 2025. – № 2. – С. 22–30.
18. Sinenko S. Technical reserves for increasing productivity through digital transformation of construction production / S. Sinenko, I. Savin, I. Abramov, V. Savina // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 559. – С. 04031.
19. Колесников Н. В. Совершенствование расчетов соединений анизотропных конструкционных материалов / Н. В. Колесников, М. В. Арискин, Д. О. Мартышкин, А. В. Меркушов // Вестник НИЦ Строительство. – 2024. – № 2 (41). – С. 69–78.
20. Abramov I. L., Alzaidi Z. A. Assessing of sustainable construction quality in iraq under conditions of risk factors / I. L. Abramov, Z. A. Alzaidi // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2023. – Vol. 1232, № 1. – С. 012041.

© И. Н. Гарькин

Ссылка для цитирования:

Гарькин И. Н. Применение эволюционно-стабильной стратегии для повышения эффективности работы строительных конструкций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 3 (53). С. 25–31.