

Оптимизация рамных конструкций с учетом возможности запроектных воздействий

*Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой И.Н. Серпик;
к.т.н., доцент А.В. Алексейцев,*

ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия»

Аннотация. В статье поставлена задача оптимизации стальных плоских рам на дискретных множествах параметров с учетом возможности возникновения аварийных ситуаций. Поиск решения осуществляется с использованием эволюционного моделирования.

Вычислительная схема включает следующие основные этапы: нахождение на основе оптимального проектирования варианта конструкции, удовлетворяющего требованиям СНиП; выполнение расчетов этого объекта в статической и динамической постановках в условиях появления локальных повреждений с определением динамического коэффициента для каждого рассматриваемого запроектного воздействия; реализация последовательности эволюционных синтезов конструкции при выполнении расчетов деформаций поврежденных стержневых систем в квазистатической постановке с учетом полученных динамических коэффициентов. Далее выполняется уточнение динамических коэффициентов при задании значений параметров конструкции, установленных в результате оптимального проектирования, и осуществляется проверка живучести и удовлетворения требований СНиП для синтезированной несущей системы. По результатам этой проверки могут корректироваться исходные предпосылки для расчетов и повторно выполняться процедуры оптимизации.

Анализ нестационарной динамики выполняется в физически и геометрически нелинейной постановке с использованием ассоциированного закона течения. Расчет в статической постановке реализуется в рамках деформационной теории пластичности с учетом влияния продольных сил на изгиб стержней.

Ключевые слова: запроектные воздействия; генетические алгоритмы; живучесть конструкций; параметрическая оптимизация; стальные рамы

Введение

В последнее время существенно увеличилось число аварий, приводящих к разрушению строительных систем. Часть из этих разрушений связана с воздействиями, которые не предусмотрены условиями нормальной эксплуатации конструкций, или так называемыми запроектными воздействиями [1, 2]. В 2009 году был принят федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», согласно которому для зданий и сооружений повышенного уровня ответственности «должны быть предусмотрены конструктивные и организационно-технические меры по защите жизни и здоровья людей и окружающей среды от опасных последствий аварий». Повышение живучести строительных объектов обычно сопряжено с весьма существенными материальными затратами. Одним из путей снижения этих затрат является оптимальное проектирование несущих систем, в котором принимались бы во внимание как нормативные, так и запроектные воздействия.

Вопросам анализа поведения несущих конструкций при запроектных воздействиях посвящен ряд исследований [3–9]. Особое внимание при этом уделялось динамическому догружению систем при мгновенном выключении из объекта одного или нескольких конструктивных элементов. Задача оптимального проектирования конструкций с учетом возможных аварийных ситуаций рассматривалась в работах [10–19]. В статьях [10, 11] предлагается осуществлять оптимизацию характеристик надежности неразрезных железобетонных балок, используя прямой метод вероятностного анализа. В дальнейшем этот подход получил развитие в работах [12–14], где для оптимизации живучести железобетонных стержневых конструкций прямой метод вероятностного анализа использовался совместно с принципом эквиградиентности Г.А. Гениева. В работе [15] анализировалась проблема оптимизации полусферической оболочки, предназначенной для защиты от экстремальных ситуаций в шахтах. Статьи [16–19] посвящены изучению вопросов оптимизации тонкостенных конструкций при условии обеспечения их ударопрочности.

Оптимизация несущих систем с учетом аварийных ситуаций, как правило, выполнялась на непрерывных множествах варьируемых параметров. В то же время процесс реального Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация рамных конструкций с учетом возможности запроектных воздействий

строительного проектирования обычно требует выбора параметров несущей конструкции на ограниченных дискретных множествах допустимых значений. К настоящему времени в современных информационных технологиях получило распространение эволюционное моделирование, иначе называемое генетическими алгоритмами [20]. Эти алгоритмы, построенные по схеме эволюции видов в живой природе, позволяют выполнять поиск рациональных решений как на непрерывных, так и на дискретных множествах параметров состояния. При этом по сравнению с традиционными методами случайного поиска генетические итерационные схемы обеспечивают возможность рассмотрения значительно большего числа варьируемых переменных и более эффективны в нахождении глобальных экстремумов. Вопрос применения генетических алгоритмов для оптимизации несущих систем при нормативных воздействиях уже достаточно подробно рассматривался в литературе [21–33], однако для решения сложных технических задач с учетом аварийных ситуаций эволюционное моделирование еще не получило широкого распространения. В настоящей работе представляется методика оптимизации стальных плоских рам с учетом возможности внезапного удаления ряда связей в расчетной схеме. Поиск осуществляется с использованием эволюционного моделирования на дискретных множествах параметров.

Постановка задачи и общая схема параметрической оптимизации

Минимизируется стоимость C_6 материала стержневой рамы:

$$C_6(Y) = \sum_{i=1}^n c_i m_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где Y – система дискретных множеств допустимых значений варьируемых размеров поперечных сечений стержней; n – число стержней; c_i , m_i – стоимость единицы массы и масса i -го стержня.

Вводятся ограничения по выполнению требований СНиП и предотвращению недопустимо больших изменений геометрии конструкции в условиях мгновенного возникновения отдельных локальных повреждений. Напряженно-деформированное состояние объектов рассчитывается с помощью метода конечных элементов в рамках метода перемещений.

Алгоритм оптимального синтеза включает следующие основные этапы.

1. Нахождение на основе оптимального проектирования варианта исследуемой конструкции, удовлетворяющего требованиям СНиП, методом эволюционного моделирования с использованием подходов работы [32].

2. Выполнение расчетов этого варианта конструкции в статической и динамической постановках в условиях появления локальных повреждений. Расчет в статической постановке реализуется в рамках деформационной теории пластичности с учетом влияния продольных сил на изгиб стержней. Анализ нестационарной динамики осуществляется на основе методики работы [34] в физически и геометрически нелинейной постановке. Определяется динамический коэффициент для каждого рассматриваемого запроектного воздействия:

$$k_d = \alpha_s / \alpha_d, \quad (2)$$

где α_s , α_d – коэффициенты запаса несущей способности для статического и динамического нагружений.

3. Реализация последовательности эволюционных синтезов конструкции при выполнении расчетов деформаций поврежденных стержневых систем в квазистатической постановке с учетом полученных динамических коэффициентов в рамках используемой на этапе 2 процедуры анализа работы несущей системы при статическом нагружении. При этом для каждой новой оптимизации допустимые параметры проектирования должны иметь не меньшие значения, чем соответствующие величины, полученные на предыдущем поиске.

4. Уточнение динамических коэффициентов при задании значений параметров конструкции, установленных в результате выполнения этапа 3.

5. Проверка живучести и удовлетворения требований СНиП для синтезированной несущей системы.

6. По результатам расчетов на этапах 4, 5 алгоритма этапы 2, 3 могут реализовываться повторно.

Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация рамных конструкций с учетом возможности запроектных воздействий

Эволюционная оптимизация для поврежденной конструкции

При минимизации значения C_6 в расчетах этапа 3 учитываются ограничения по узловым перемещениям. Для каждого i -го узла ставится условие:

$$p_i = \frac{f_i}{f_{ia}} - 1 \leq 0, \quad (3)$$

где p_i – величина, используемая для оценки удовлетворения поставленного ограничения; f_i – модуль вектора перемещения узла; f_{ia} – предельно допустимое значение этого перемещения.

Каждый проект интерпретируется как особь с определенным набором генов (параметров). Дискретные множества допустимых значений параметров выстраиваются от меньшего к большему. В эволюционной процедуре принимается во внимание основная группа проектов I, имеющая фиксированное четное число N объектов, и вспомогательная группа II улучшенных объектов, размер которой зависит от результатов работы эволюционного алгоритма, но не превышает N . Первоначально формируются проекты группы I из одинаковых вариантов конструкции с наибольшими допустимыми значениями параметров. Далее осуществляется движение по поколениям (итерационный процесс), включающее следующие основные действия.

Проверка выполнения ограничений для объектов группы I. Моделирование работы стержней выполняется в упруго-пластической постановке в рамках многослойной схемы. При этом слои дискретизируются с использованием ферменных конечных элементов. Для пакета слоев в целом считается справедливой гипотеза плоских сечений.

Влияние продольных сил в стержнях на изгибные деформации учитывается с помощью геометрических матриц (или матриц устойчивости) [35] конечных элементов. Выполняются расчеты напряженно-деформированного состояния вариантов конструкции методом последовательных приближений. В каждой итерации $s > 1$ решается следующая система линейных алгебраических уравнений:

$$\left([K^{(s)}] + [K_G^{(s)}] \right) \{ \delta^{(s)} \} = \{ R \}, \quad (4)$$

где $[K^{(s)}]$ – матрица жесткости конечно-элементной модели для итерации s , получаемая с учетом текущих модулей упругости материала, которые определяются для каждого i -го конечного элемента по результатам выполнения итерации $s-1$; $[K_G^{(s)}]$ – геометрическая матрица системы конечных элементов в итерации s , выражающаяся через продольные силы в стержнях, полученные в $s-1$ -й итерации; $\{ \delta^{(s)} \}$ – вектор узловых перемещений, вычисляемый в итерации s ; $\{ R \}$ – вектор приведенной к узлам внешней нагрузки.

В первой итерации объект рассчитывается в линейно упругой постановке. При этом группа объектов I разделяется на подгруппы α и β . Если для какого-либо из проектов подгруппы α не удовлетворяется условие (3), то он заменяется не используемым в группе I проектом из группы II или вновь сформированным вариантом несущей системы. Если ограничения не удовлетворяются для объекта из группы β , то вводится штраф путем умножения значения целевой функции на коэффициент

$$k_p = \left(1 + \xi \chi \left(p_{f_{\max}} \right) \right) p_{f_{\max}}, \quad (5)$$

где ξ – задаваемое положительное число; $\chi(x)$ – функция Хэвисайда от некоторого аргумента x ($\chi(x) = 0$, если $x < 0$; $\chi(x) = 1$, если $x \geq 0$); $p_{f_{\max}}$ – максимальное значение p_f для проверяемого проекта конструкции.

Корректировка группы II улучшенных проектов. Каждый из объектов группы I проверяется по двум критериям: существует ли такой объект в группе II, и не превышает ли значение C_6 рассматриваемого объекта наибольшего значения целевой функции в данной группе. Если оба условия не выполняются, объект включается в группу II. В том случае, когда Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация рамных конструкций с учетом возможности запроектных воздействий

число объектов во вспомогательной группе превысит N , проект с наибольшим значением C_6 из нее удаляется.

Проверка удовлетворения критерию окончания эволюционного алгоритма. Расчеты показывают, что при оптимальном синтезе рам с помощью рассматриваемой итерационной схемы отсутствие изменений в группе II в течение 300–500 поколений говорит о целесообразности остановки оптимизации. Дальнейшее продолжение итерационного процесса обычно не приводит к сколько-нибудь существенному изменению параметров для наиболее рациональных проектов. Эволюционное моделирование является эффективным инструментом для выхода из локальных экстремумов. Тем не менее, для задач переборного типа в общем случае не существует достоверного критерия получения глобального оптимума, кроме полного перебора вариантов.

Мутация (случайное изменение параметров). Случайным образом для части проектов группы I может быть изменено несколько параметров. Вводится следующая схема выбора значения рассматриваемого параметра. С помощью датчика случайных чисел, оперирующего на отрезке (0,1) и имеющего равномерный закон распределения, находится значение m_a , которое сравнивается с управляющим числом мутации m . Если соблюдается неравенство $m_a > m$, то случайно с равной вероятностью выбирается любая из допустимых величин. В противном случае на единицу может увеличиваться или уменьшаться номер текущей позиции величины этого параметра во множестве его допустимых значений.

Селекция и кроссинговер. Для объектов группы I выполняется селекция по критерию значения целевой функции с использованием метода рулетки и реализуется процедура одноточечного кроссинговера (обмена значениями параметров) [20]. Объекты, входящие в группы α и β , участвуют в этих операциях на равных основаниях.

Пример оптимизации рамы

В качестве примера выполнялась оптимизация рамы (рис. 1), изготовленной из стали С345. Считалось, что стержни рамы имеют сварные двутавровые профили. Учитывались запроектные воздействия путем независимого мгновенного устранения опор C и D . Варьировались размеры полок и стенок в поперечных сечениях двутавров при обеспечении указанной на рисунке 1 симметрии сечений и конструкции рамы. Для всех узлов задавалось $f_{ia} = 1,8$ м.

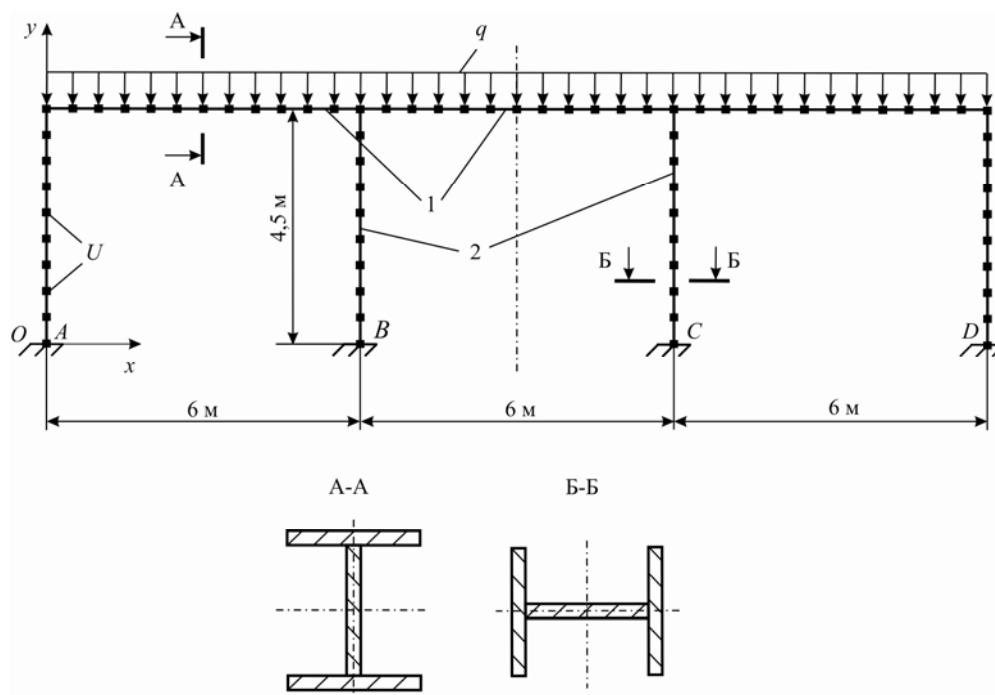


Рисунок 1. Плоская рама: U – узлы конечно-элементной модели; 1 – балки; 2 – стойки

Последовательно выполнялись 3 реализации эволюционной оптимизации: 1) с учетом требований СНиП; 2) при удалении опоры *D*; 3) при удалении опоры *C*. Первоначально динамические коэффициенты для объектов без опор *D* и *C* получились соответственно равными 1,49 и 1,81. При уточнении эти значения изменялись не более чем на 3%, что не приводило к сколько-нибудь существенной корректировке результатов оптимизационных расчетов. На рисунке 2 отражено изменение стоимости конструкции в ценах 2013 г. для первых 300 итераций оптимизационных процессов. Продолжение каждого из этих поисков путем выполнения еще 300–400 итераций не изменяло параметры наиболее эффективного проекта.

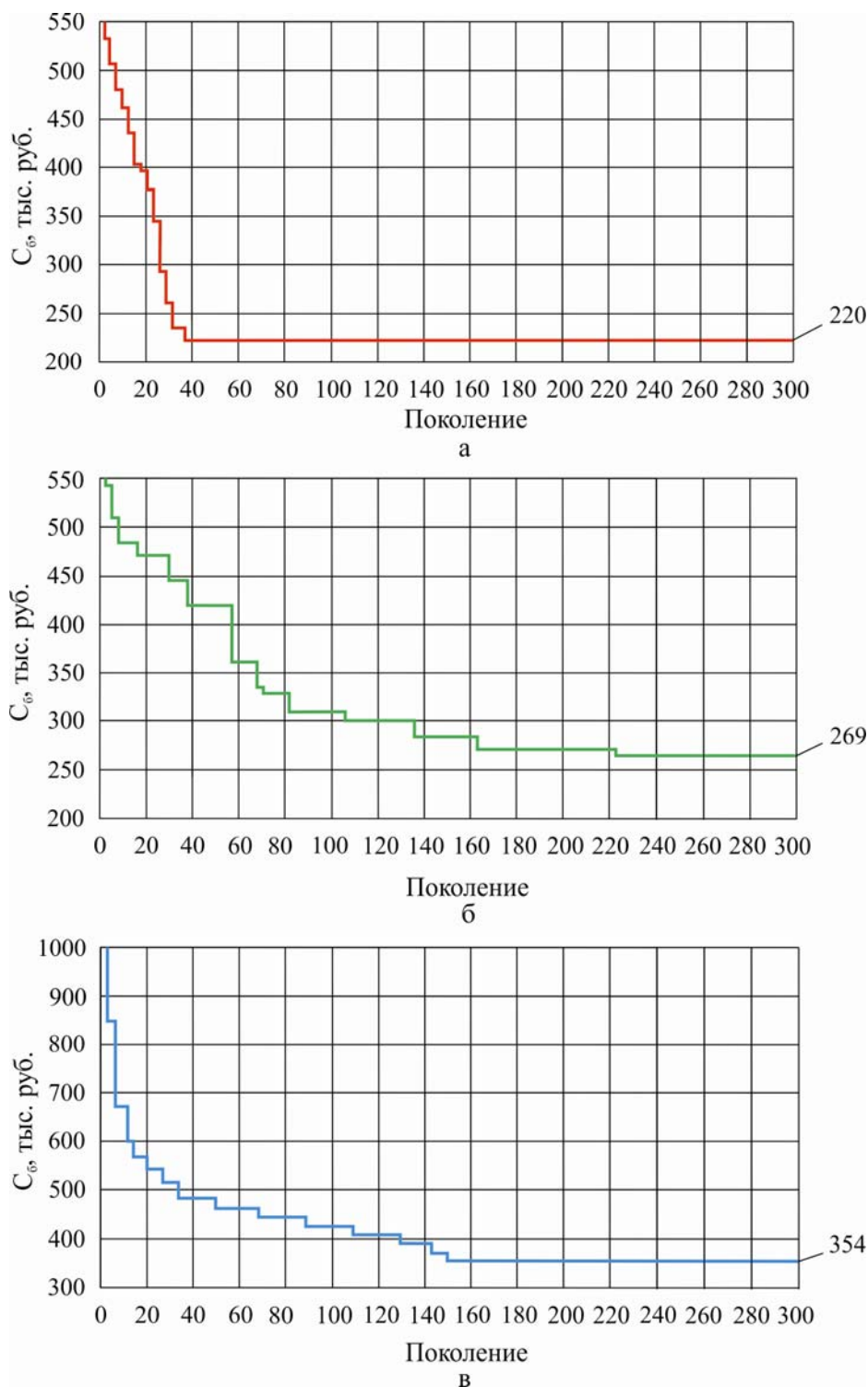


Рисунок 2. Изменение себестоимости рамы в итерационных процессах:
а – при ограничениях для условий нормальной эксплуатации объекта;
б, в – при рассмотрении возможности мгновенного удаления опор *D* и *C*

Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация рамных конструкций с учетом возможности запроектных воздействий

Заключение

1. Предложена эволюционная процедура оптимизации рамных стальных конструкций на дискретных множествах параметров с учетом возможности запроектных воздействий в виде локальных повреждений.

2. Работоспособность данного алгоритма проиллюстрирована на примере оптимального проектирования плоской трехпролетной рамы, рассматриваемой при действии нормативных эксплуатационных нагрузок и в условиях мгновенного устранения отдельных опор.

3. Использование рассматриваемой вычислительной схемы даст возможность снизить дополнительные затраты на защиту от последствий аварий зданий и сооружений повышенного уровня ответственности.

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ №13-08-00457 «Оптимизация конструктивных систем с учетом возможности аварийных ситуаций».

Литература

1. Колчунов В.И. Основные направления развития конструктивных решений и обеспечение безопасности жилища // Промышленное и гражданское строительство. 2007. №10. С. 12–15.
2. Тамразян А.Г. Рекомендации к разработке требований к живучести зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. №2. С. 77–83.
3. Колчунов В.И., Скобелева Е.А., Ключева Н.В. К расчету живучести внезапно повреждаемых железобетонных рам с элементами составного сечения // Academia. Архитектура и строительство. 2006. №3. С. 23–26.
4. Ключева Н.В., Бухтиярова А.С., Прокопенко В.В. К определению параметра живучести пространственных конструктивных систем смешанным методом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. №3. С. 146–149.
5. Chen J., Huang X., Ma R., He M. Experimental study on the progressive collapse resistance of a two-story steel moment frame // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2012. Vol. 26. No.5. Pp. 567–575.
6. Ellingwood B.R., Dusenberry D.O. Building design for abnormal loads and progressive collapse // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2005. Vol. 20. No.3. Pp. 194–205.
7. Kuhlmann U., Roelle L., Izzuddin B.A. Resistance and response of steel and steel-concrete composite structures in progressive collapse assessment // Structural Engineering International. 2012. Vol. 22. No.1. Pp. 86–92.
8. Starossek U., Haberland M. Disproportionate collapse: terminology and procedures // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2010. Vol. 24. No.6. Pp. 519–528.
9. Vlassis A., Izzuddin B., Elghazouli A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to failed floor impact // Engineering Structures. 2009. Vol. 31. No.7. Pp. 1522–1534.
10. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Дегтярь А.Н. О применении прямого метода вероятностного анализа к задачам оптимизации характеристик надежности железобетонных многопролетных балок при мгновенном отказе отдельных конструктивных элементов // Сборник научных трудов ЦРО РААСН. Вып. 1. М., 2002. С. 32–36.
11. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Дегтярь А.Н. Вопросы оптимизации характеристик надежности железобетонных многопролетных балок с позиции минимальной вероятности их отказа // Материалы вторых международных академических чтений «Новые энергосберегающие архитектурно-конструктивные решения жилых и гражданских зданий». Орел, 2003. С. 163–166.
12. Колчунов В.И., Дегтярь А.Н., Оссовских Е.В. К оптимизации надежности пространственных покрытий из железобетонных панелей оболочек КСО // Известия Орловского государственного технического университета. Серия «Строительство. Транспорт». 2004. № 3-4. С. 35–38.
13. Бондаренко В.М., Ключева Н.В., Дегтярь А.Н., Андросова Н.Б. Оптимизация живучести конструктивно нелинейных железобетонных рамно-стержневых систем при внезапных структурных изменениях // Известия Орловского государственного технического университета. Серия «Строительство. Транспорт». 2007. №4. С. 5–10.
14. Ключева Н.В., Андросова Н.Б. Анализ живучести нагруженных коррозионно повреждаемых железобетонных конструктивных систем // Вестник отделения архитектуры и строительных наук. 2009. №13. С. 152–162.

Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация рамных конструкций с учетом возможности запроектных воздействий

15. Guoyun L., Guoquan Z., Zhijun H. Design and optimization of an emergency shelter // *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE): Int. Conf. Wuhan, China, 2010*. Pp. 705–708.
16. Han J., Yamazaki K. Crashworthiness optimization of S-shape square tubes // *International Journal of Vehicle Design*. 2003. Vol. 31. No.1. Pp. 72–85.
17. Khajavi M.N., Notghi B., Paygane G. A multi objective optimization approach to optimize vehicle ride and handling characteristics // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2010. Vol. 62. Pp. 580–584.
18. Nariman-Zadeh K.N., Masoumi A., Darvizeh A., Notghi B. Robust multi-objective optimization of the S-shape energy absorbers with parametric uncertainties // *Proceedings of the Annual International Conference on Mechanical Engineering*. Tehran, Iran. 2001. Pp. 187–192.
19. Schumacher, A., Parameter-based optimization for crashworthiness structures // *6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization*. Rio de Janeiro, Brazil. 2005. – Pp. 1–10.
20. Гладков Л. А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. М.: Физматлит, 2010. 317 с.
21. Erbatur F., Hasancebi O., Tutuncu I., Kilic H. Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms // *Computers and Structures*. 2000. Vol. 75. Pp. 209–224.
22. Nanakorn P., Meesomklin K. An adaptive penalty function in genetic algorithms for structural design optimization // *Computers and Structures*. 2001. Vol. 79. No. 2. Pp. 2527–2539.
23. Jenkins W.M. A decimal-coded evolutionary algorithm for constrained optimization // *Computers and Structures*. 2002. Vol. 80. No. 5-6. Pp. 471–480.
24. Серпик И.Н., Мирошников В.В., Серпик М.И., Тютюнников А.И. Генетическая процедура синтеза несущих конструкций вагонов // *Качество машин: Сборник трудов IV Международной научно-технической конференции*. Брянск: БГТУ, 2001. Т.1. С. 75–77.
25. Серпик И.Н., Алексейцев А.В., Левкович Ф.Н., Тютюнников А.И. Структурно-параметрическая оптимизация стержневых металлических конструкций на основе эволюционного моделирования // *Известия вузов. Строительство*. 2005. №8. С. 16–24.
26. Мосин А. М. Оптимальное проектирование упругодеформируемых стальных порталных рам с элементами переменной жесткости на основе генетического алгоритма: Дис...канд. техн. наук. Екатеринбург, 2004. 134 с.
27. Balling R.J., Briggs R.R., Gillman K. Multiple optimum size/shape/topology designs for skeletal structures using a genetic algorithm // *Journal of Structural Engineering*. 2006. Vol 132. No. 7. Pp. 1158–1165.
28. Юрьев А.Г., Ключев С.В. Эволюционные и генетические алгоритмы оптимизации строительных конструкций. Белгород: Издательство Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2006. 134 с.
29. Togan V., Daloglu A.T. An improved genetic algorithm with initial population strategy and self-adaptive member grouping // *Computers and Structures*. 2008. Vol. 11–12. P. 1204–1218.
30. Kaveh A., Malakouti Rad S. Hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization for the force method-based simultaneous analysis and design // *Iranian Journal of Science and Technology*. 2010. Vol. 34. No.B1. Pp. 15–34.
31. Ghasemi M.R., Yousefi M. Reliability-based optimization of steel frame structures using modified genetic algorithm // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2011. Vol. 12. No. 4. Pp. 449–475.
32. Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Построение высокопроизводительного алгоритма оптимизации стержневых систем на основе комбинированной эволюционной стратегии // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2011. №5. С. 58–63.
33. Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация металлических конструкций путем эволюционного моделирования. М.: Издательство АСВ, 2012. 240 с.
34. Серпик И.Н., Курченко Н.С., Алексейцев А.В., Лагутина А.А. Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. №10. С. 49–51.
35. Smith I.M., Griffiths D.V. Programming the finite element method. Fourth edition. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004. 628 p.

*Игорь Нафтольевич Серпик, г. Брянск, Россия
Тел. раб.: +7(4832)648800; эл. почта: iserpik@online.debryansk.ru*

*Анатолий Викторович Алексейцев, г. Брянск, Россия
Тел. моб.: +7(960)564-33-58; эл. почта: aalexw@mail.ru*

© Серпик И.Н., Алексейцев А.В., 2013

doi: 10.5862/MCE.44.3

Optimization of frame structures with possibility of emergency actions

I.N. Serpik

*Bryansk State Academy of Engineering and Technology, Bryansk, Russia
+7(4832)648800; e-mail: iserpik@online.debryansk.ru*

A.V. Alekseytsev

*Bryansk State Academy of Engineering and Technology, Bryansk, Russia
+7(960)564-33-58; e-mail: aalexw@mail.ru*

Key words

emergency actions; genetic algorithms; survivability of structures; parameter optimization; steel frames

Abstract

The purpose of the research was to develop the method for optimizing the plane steel frames on the discrete sets of parameters with possibility of emergency actions. The search for the solution was carried out using genetic algorithm.

The computational scheme included the following main steps: finding the optimal embodiment taking into account the conditions of normal use of the building; performing calculations of this object in the static and dynamic formulations in the assumption of local damages with the estimation of dynamic coefficient for each considered emergency action; optimal design of the construction with the calculations of the damaged rod systems in a quasi-static formulation using the obtained dynamic coefficients.

The analysis of the transient dynamics was executed in the physically and geometrically nonlinear formulation using the associated flow rule. Calculation in the static formulation was implemented within the framework of the deformation plasticity theory with the account for rods of the influence of normal forces on bending.

The example of optimal synthesis of the three-span plane frame with the fast damages of any of its column supports was considered. The proposed methodology can be recommended for use in the design of buildings and structures with high level of safety.

References

1. Kolchunov V.I. *Industrial and Civil Engineering*. 2007. No. 10. Pp. 12–15. (rus)
2. Tamrazian A.G. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2011. Vol. 1. No. 2. Pp. 77–83. (rus)
3. Kolchunov V.I., Skobeleva E.A., Kliueva N.V. *Academia. Architecture and Construction*. 2006. No. 3. Pp. 23–26. (rus)
4. Kliueva N.V., Bukhtiarova A.S., Prokopenko V.V. *Proceedings of the Southwest State University*. 2011. No. 3. Pp. 146–149. (rus)
5. Chen J., Huang Kh., Ma R., He M. Experimental study on the progressive collapse resistance of a two-story steel moment frame. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2012. Vol. 26. No. 5. Pp. 567–575.
6. Ellingwood B.R., Dusenberry D.O. Building design for abnormal loads and progressive collapse. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2005. Vol. 20. No. 3. Pp. 194–205.
7. Kuhlmann U., Roelle L., Izzuddin B.A. Resistance and response of steel and steel-concrete composite structures in progressive collapse assessment. *Structural Engineering International*. 2012. Vol. 22. No. 1. Pp. 86–92.
8. Starossek U., Haberland M. Disproportionate collapse: terminology and procedures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2010. Vol. 24. No. 6. Pp. 519–528.
9. Vlassis A., Izzuddin V., Elghazouli A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to failed floor impact. *Engineering Structures*. 2009. Vol. 31. No. 7. Pp. 1522–1534.

10. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Degtiar A.N. *Sbornik nauchnykh trudov TsRO RAASN* [Proceedings of TsRO RAASN]. Issue 1. Moscow, 2002. Pp. 32–36. (rus)
11. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Degtiar A.N. *Materialy vtorykh mezhdunarodnykh akademicheskikh chteniy "Novye energosberegaiushchiye arkhitekturno-konstruktivnye resheniya zhilykh i grazhdanskikh zdaniy"* [Proceedings of Second International academic readings "New energy saving architectural designs of residential and public buildings"]. Orel, 2003. Pp. 163–166. (rus)
12. Kolchunov V.I., Degtiar A.N., Ossovskikh E.V. *Proceedings of Orel State Technical University. Series: Building. Transport.* 2004. No. 3–4. Pp. 35–38.
13. Bondarenko V.M., Kliueva N.V., Degtiar A.N., Androsova N.B. *Proceedings of Orel State Technical University. Series: Building. Transport.* 2007. No. 4. Pp. 5–10. (rus)
14. Kliueva N.V., Androsova N.B. *Vestnik otdeleniia arkhitektury i stroitelnykh nauk.* 2009. No. 13. Pp. 152–162. (rus)
15. Guoyun L., Guoquan Z., Zhijun H. *Design and optimization of an emergency shelter Mechanic Automation and Control Engineering (MACE): Int. Conf. Wuhan, China, 2010.* Pp. 705–708.
16. Han J., Yamazaki K. Crashworthiness optimization of S-shape square tubes. *International Journal of Vehicle Design.* 2003. Vol. 31. No. 1. Pp. 72–85.
17. Khajavi M.N., Notghi B., Paygane G. A multi objective optimization approach to optimize vehicle ride and handling characteristics. *World Academy of Science, Engineering and Technology.* 2010. Vol. 62. Pp. 580–584.
18. Nariman-Zadeh K.N., Masoumi A., Darvizeh A., Notghi B. Robust multi-objective optimization of the S-shape energy absorbers with parametric uncertainties. *Proceedings of the Annual International Conference on Mechanical Engineering.* Tehran, Iran. 2001. Pp. 187–192.
19. Schumacher A. Parameter-based optimization for crashworthiness structures. *6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization.* Rio de Janeiro, Brazil. 2005. Pp. 1–10.
20. Gladkov L. A., Kureichik V.V., Kureichik V.M. *Geneticheskiye algoritmy* [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2010. 317 p. (rus)
21. Erbatur F., Hasancebi O., Tutuncu I., Kilic H. Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms. *Computers and Structures.* 2000. Vol. 75. Pp. 209–224.
22. Nanakorn P., Meesomklin K. An adaptive penalty function in genetic algorithms for structural design optimization. *Computers and Structures.* 2001. Vol. 79. No. 2. Pp. 2527–2539.
23. Jenkins W.M. A decimal-coded evolutionary algorithm for constrained optimization. *Computers and Structures.* 2002. Vol. 80. No. 5–6. Pp. 471–480.
24. Serpik I.N., Miroshnikov V.V., Serpik M.I., Tiutiunnikov A.I. *Kachestvo mashin: Sbornik trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Quality of machines: Proceedings of the IV International scientific and technical conference]. Bryansk: BGTU, 2001. Vol. 1. Pp. 75–77. (rus)
25. Serpik I.N., Alekseitsev A.V., Levkovich F.N., Tiutiunnikov A.I. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2005. No. 8. Pp. 16–24. (rus)
26. Mosin A.M. *Optimalnoye proektirovaniye uprugodeformiruemykh stalnykh portalnykh ram s elementami peremennoy zhestkosti na osnove geneticheskogo algoritma* [Optimal designing of elastically deformable steel portal frames with elements of variable stiffness based on genetic algorithm]. PhD thesis. Yekaterinburg, 2004. 134 p. (rus)
27. Balling R.J., Briggs R.R., Gillman K. Multiple optimum size/shape/topology designs for skeletal structures using a genetic algorithm. *Journal of Structural Engineering.* 2006. Vol. 132. No. 7. Pp. 1158–1165.
28. Yuryev A.G., Kliuev S.V. *Evolutsionnyye i geneticheskiye algoritmy optimizatsii stroitelnykh konstruksii* [Evolutionary and genetic algorithms for optimization of building constructions]. Belgorod: Izdatelstvo Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova, 2006. 134 p. (rus)
29. Togan V., Daloglu A.T. An improved genetic algorithm with initial population strategy and self-adaptive member grouping. *Computers and Structures.* 2008. Vol. 11–12. Pp. 1204–1218.
30. Kaveh A., Malakouti Rad S. Hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization for the force method-based simultaneous analysis and design. *Iranian Journal of Science and Technology.* 2010. Vol. 34. No. B1. Pp. 15–34.
31. Ghasemi M.R., Yousefi M. Reliability-based optimization of steel frame structures using modified genetic algorithm. *Asian Journal of Civil Engineering.* 2011. Vol. 12. No. 4. Pp. 449–475.
32. Serpik I.N., Alekseitsev A.V. *Structural Mechanics and Design of Structures.* 2011. No. 5. Pp. 58–63. (rus)

33. Serpik I.N., Alekseytsev A.V. *Optimizatsiya metallicheskih konstruksiy putem evolyutsionnogo modelirovaniya* [Optimization of metal structures by evolutionary modeling]. Moscow: Izdatelstvo ASV, 2012. 240 p. (rus)
34. Serpik I.N., Kurchenko N.S., Alekseytsev A.V., Lagutina A.A. *Industrial and Civil Construction*. 2012. No. 10. Pp. 49–51. (rus)
35. Smith I.M., Griffiths D.V. *Programming the finite element method*. Fourth edition. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004. 628 p.

Full text of this article in Russian: pp. 23–29