

УДК 624.014.2

© А. А. Василькин, канд. техн. наук, доцент
(Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет)
E-mail: vergiz@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-4-61-65

© A. A. Vasil'kin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(National Research University Moscow State University
of Civil Engineering)
E-mail: vergiz@mail.ru

К ПОСТРОЕНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ABOUT CREATING AN AUTOMATED SYSTEM FOR DETERMINING OPTIMAL PARAMETERS OF STEEL STRUCTURES

Необходимость повышения эффективности проектирования растет вместе с ростом спроса на строительные объекты. С учетом значительного количества переменных факторов, влияющих на качество проекта, задача их оценки является сложной и неоднозначной. Наличие большого объема информации не гарантирует того, что инженер примет наиболее эффективное решение. Представлена разработка системы поддержки принятия решений на начальных этапах проектирования, которая должна представить инженеру необходимую информацию для принятия проектных решений на основе анализа альтернативных вариантов.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование стальных конструкций, оптимальное решение, критерий оптимальности.

The need to improve the efficiency of design is increasing with the growth of demand for construction projects. Given the significant number of variables that affect the quality of the project, the task of assessing them is complex and multiple valued. Availability of a large amount of information can by no means guarantee that the engineer will come to the most effective solution. The article presents the development of a solution support system envisaged for using at the initial design stages, which should provide the engineer with the necessary information to make justified design solutions based on the analysis of alternative options.

Keywords: automated design of steel structures, optimal solution, criterion of optimality.

Современное строительство характеризуется ростом стоимости возводимых объектов и усилением конкуренции на рынке проектирования, что стимулирует специализированные организации к снижению стоимости проектных работ и уменьшению сроков проектирования [1].

Разработка проектных решений строительных конструкций является многовариантной задачей, при проработке вариантов которой затрачиваются значительные трудовые ресурсы [2]. На этапе вариантного проектирования получают некоторое количество проектных решений, удовлетворяющих требованиям прочности и долговечности, но отличающихся своей стоимостью.

Поиск наиболее экономичного варианта проектного решения относят к оптимизационной задаче, когда выделяется целевая функция, задаются ограничения и на основе принятого критерия оптимальности получают искомое решение [3].

По мнению специалистов, применение методов оптимизации является одним из наиболее действенных способов повышения качества проектирования [4]. Вопросам оптимизации строительных конструкций посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных ученых [5–7].

Несмотря на широкий спектр современных методов оптимизации [8] и расширение области

их эффективного применения [4], для успешного выполнения оптимизационных расчетов стальных конструкций необходимо осуществить увязку основных компонентов методики проектирования стальных конструкций в единую информационную систему. Подобная увязка может быть выполнена в рамках системного подхода путем комплексной автоматизации процесса обмена данными между подсистемами [9].

При разработке методики автоматизированного проектирования принимается, что точное решение оптимизационной задачи может быть достигнуто не всегда, поскольку в большинстве случаев модель объекта проектирования может включать в себя условия, сложно поддающиеся формализации [10]. Поэтому целесообразно иметь несколько решений, близких к оптимальному. Также необходимо учесть влияние вариаций исходных параметров на окончательный результат.

Задача поиска оптимального проектного решения на этапе вариантного проектирования формулируется следующим образом: определить тип несущей конструкции, выяснить требуемое количество несущих элементов, найти положение элементов и конструкций в пространстве, линейные размеры, профиль и параметры сечений, при которых сумма затрат на материал, изготовление, транспортировку, монтаж, создание, эксплуатацию и ремонт несущих конструкций будет минимальной в течение всего срока эксплуатации сооружения с учетом ограничений, установленных нормами проектирования стальных конструкций.

Для решения поставленной задачи автором предложена система поддержки принятия инженерных решений.

1. На первом этапе выбирается оптимизируемая конструкция — балка, ферма, колонна или система конструкций — покрытие, каркас, связи и т. п.

2. Определяется исходный вариант конструктивной схемы. Как правило, он выбирается из нескольких традиционных вариантов компоновки сооружения и объемно-планировочных решений исходя из опыта проектирования сооружений подобного класса.

3. В качестве критерия оптимальности конструкции может быть принят минимум затрат

на стоимость материала, изготовление, транспортировку, монтаж, эксплуатацию конструкции, скорость монтажа, трудоемкость монтажа. Как известно, критерии оптимальности могут находиться в противоречии, являясь зачастую трудно формализуемыми в математической постановке задачи [11], поэтому вопрос выбора критерия является весьма важным.

4. Решается задача построения структурной схемы начального варианта объекта проектирования для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС). Задаются стоимость материалов, метизов, сварочной проволоки, при необходимости — трудоемкость и стоимость изготовления, транспортировки, эксплуатации и ремонта.

5. Задаются соответствующие ограничения: по первому и второму предельному состоянию, усталостной долговечности, живучести, хрупкого разрушения, конструктивные и геометрические (транспортный габарит).

6. Как правило, начальный вариант проектируемой конструкции далек от оптимального и может иметь избыточную структуру. Для получения оптимальной топологии объекта проектирования проводится структурная оптимизация с помощью генетического алгоритма, в результате работы которого ряд элементов конструкции «вырождаются», образуя новую структурную схему объекта проектирования.

7. Выполняется анализ оптимальной топологии конструкции с учетом конструктивных ограничений: возможности ее изготовления, соответствия функциональному назначению и удобства сопряжения с другими строительными конструкциями. При необходимости выполняется корректировка топологии конструкции с учетом наложенных ограничений.

8. Составляется алгоритм расчета конструкции в соответствии с имеющимися методиками расчета соответствующих типов сооружений и нормативными указаниями.

9. Разрабатывается программное средство, которое реализует составленный алгоритм расчета конструкции. Для этого удобно использовать численные методы на основе метода конечных элементов (МКЭ), реализованные в большом числе известных вычислительных комплексов; при необходимости в области концентрации

напряжений может выбираться группа узлов оптимизируемых элементов для уточнения НДС.

10. Выполняется запуск программного средства, которое выполняет циклический расчет конструкции с последовательным перебором заданных значений варьируемых параметров.

11. В результате каждого цикла выполняется полный расчет конструкции (этапы подбора, проверки сечения) на заданную нагрузку и с установленными ограничениями, в результате чего определяется масса конструкции.

12. Значения массы, полученные после выполнения всех циклов расчета, передаются в табличный редактор, где анализируются и выбирается минимальное значение.

13. Разрабатываются рекомендации по проектированию несущих конструкций проектируемого объекта.

Структура автоматизированной системы представлена на рисунке.

В состав системы входят следующие компоненты: база данных сортамента, классы (марки) стали, данные по трудоемкости изготовления конструкций, состав операций по изготовлению конструкции, система управления базой данных

(СУБД), имитационная модель конструкции, выполненная с помощью программного комплекса на основе МКЭ, для определения НДС методом конечных элементов [12, 13], блок параметрической оптимизации, направленный на определение объемно-планировочных решений [14], блок структурной оптимизации, задача которого — определение размеров и сечений элементов [15].

На основе разработанной автоматизированной системы можно решать следующие задачи.

1. Структурная и параметрическая оптимизация стальных строительных конструкций.

2. Расчет несущих конструкций методом конечных элементов: анализ прочности, жесткости, устойчивости, усталостной долговечности и живучести несущих элементов в геометрически и физически линейной и нелинейной постановке. Параметры имитационной модели МКЭ для исследования несущих конструкций в рамках автоматизированной системы могут быть произвольными, ограниченными лишь вычислительными возможностями.

3. Определение оптимальной объемно-планировочной схемы несущих стальных конструкций, определение минимального количе-



Структура автоматизированной системы определения оптимальных параметров несущих конструкций сооружений

ства несущих элементов по критерию минимума стоимости материала.

4. Определение срока безопасной эксплуатации конструкции при наличии дефектов.

5. Определение оптимальных межремонтных сроков конструкций с дефектами геометрической формы.

6. Визуализация и документирование результатов расчетов.

В статье показан состав системы поддержки принятия инженерных решений при проектировании стальных строительных конструкций. Данная система направлена на оценку эффективности и стоимости различных этапов жизненного цикла конструкции на начальных стадиях проектирования. Использование вычислительного средства, разработанного на основе представленной системы, позволит инженеру быстро и оперативно выполнить оценку альтернативных проектных решений.

В дальнейшем предполагается выполнение проверки представленной методологии, для этого необходимо разработать вычислительное средство и провести подробное исследование конкретных случаев с использованием реальных проектов.

Библиографический список

1. Зинченко Ю. В., Голобородько А. А. Обзор современных систем автоматизированного проектирования // Потенциал современной науки. 2016. № 4 (21). С. 68–71.
2. Hasancebi O., Bahcecioğlu T., Kurc O., Saka M. P. Optimum design of high-rise steel buildings using an evolution strategy integrated parallel algorithm // Computers and Structures. 2011. Vol. 89. Pp. 2037–2051.
3. Тамразян А. Г., Филимонова Е. А. Оптимальное проектирование железобетонных плит перекрытий по критерию минимальной стоимости // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 35–40.
4. Алексейцев А. В., Никишина А. А., Пыцкая М. С. Автоматизированное построение геологической модели строительной площадки // Инновационное развитие. 2017. № 2 (7). С. 17–21.
5. Серпик И. Н., Алексейцев А. В. Оптимизация системы стальной плоской рамы и столбчатых фундаментов // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 1 (61). С. 14–24.
6. Сергеева Е. С., Ходыревская С. В. Автоматизированный контроль процесса проектирования как

элемент системы менеджмента качества // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. С. 305–309.

7. Зубов А. П., Олейник М. М. Вариантное проектирование решетчатых крановых конструкций с целью получения оптимального решения исходя из условий эксплуатации и нагружения // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. Т. 2. № 2 (71). С. 120–123.

8. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 446 с.

9. Гинзбург А. В., Лобырева Я. А., Семернин Д. А. Системный подход при создании комплексных автоматизированных систем управления и проектирования в строительстве // Научное обозрение. 2015. № 16. С. 461–464.

10. Yang J., Ogunkah I. A Multi-Criteria Decision Support System for the Selection of Low-Cost Green Building Materials and Components // Journal of Building Construction and Planning Research. 2013. Vol. 1. Pp. 89–130.

11. Исаев А. В., Кузнецов И. Л. Вариантность критериев оптимальности при синтезе рационального конструктивного решения на примере стальных стропильных ферм // Известия КазГАСУ. 2009. № 1 (11). С. 92–98.

12. Василькин А. А., Щербина С. В. Автоматизированное решение задачи определения оптимальной высоты стальной фермы по критерию минимума массы при вариации высоты фермы // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: сб. материалов Междунар. конф. (12–13 ноября 2014 г., Москва). М.: МГСУ, 2015.

13. Василькин А. А., Рахмонов Э. Системотехника оптимального проектирования элементов строительных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2013. Т. 27. № 4. С. 111.

14. Ибрагимов А. М., Василькин А. А. Автоматизированное решение проектных задач компоновки объемно-планировочного решения складских сооружений. Ч. 1. Постановка задания // Научное обозрение. 2016. № 13. С. 32–36.

15. Парлашкевич В. С., Василькин А. А., Булатов О. Е. Проектирование и расчет металлических конструкций: учеб. пособие. М.: МГСУ, 2013.

References

1. Zinchenko Yu. V., Goloborod'ko A. A. *Obzor sovremennykh sistem avtomatizirovannogo projektirovaniya* [Review of modern computer-aided engineering design

systems]. *Potentsial sovremennoy nauki – Potential of modern science*, 2016, no. 4 (21), pp. 68–71.

2. Hasancebi O., Bahcecioglu T., Kurc O., Saka M. P. Optimum design of high-rise steel buildings using an evolution strategy integrated parallel algorithm. *Computers and Structures*, 2011, vol. 89, pp. 2037–2051.

3. Tamrazyan A. G., Filimonova E. A. *Optimal'noe proektirovanie zhelezobetonnykh plit perekrytiy po kriteriyu minimal'noy stoimosti* [Optimal design of reinforced concrete floor slab panels by criterion of the minimum cost]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2016, no. 7, pp. 35–40.

4. Alekseyev A. V., Nikishina A. A., Pytskaya M. S. *Avtomatizirovannoe postroenie geologicheskoy modeli stroitel'noy ploschadki* [Automated creation of a geological model of the building site]. *Innovatsionnoe razvitie – Innovative development*, 2017, no. 2 (7), pp. 17–21.

5. Serpik I. N., Alekseyev A. V. *Optimizatsiya sistemy stal'noy ploskoy ramy i stolbchatykh fundamentov* [Optimization of the system of a steel flat frame and pier foundations]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering-construction journal*, 2016, no. 1 (61), pp. 14–24.

6. Sergeeva E. S., Khodyrevskaya S. V. *Avtomatizirovanny kontrol' protsessa proektirovaniya kak ehlement sistemy menedzhmenta kachestva* [Automated control of design process as an element of quality management system]. *Trudy 4-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Kachestvo v proizvodstvennykh i sotsial'no-ehkonomicheskikh sistemakh»* [Proc. of the 4th Int. sci.-tech. conf. "Quality in production and social and economic systems"]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2016, pp. 305–309.

7. Zubov A. P., Oleynik M. M. *Variantnoe proektirovanie reshchatykh kranovykh konstruktsiy s tsel'yu polucheniya optimal'nogo resheniya, iskhodya iz usloviy ehkspluatatsii i nagruzheniya* [Trial design of lattice frame crane constructions for the purpose of receiving an optimal solution, proceeding from service conditions and loading]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Saratov State Technical University*, 2013, vol. 2, no. 2 (71), pp. 120–123.

8. Karpenko A. P. *Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy* [Modern algorithms of search optimization. Algorithms inspired by nature]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014, 446 p.

9. Ginzburg A. V., Lobyeva Ya. A., Semernin D. A. *Sistemnyy podkhod pri sozdanii kompleksnykh avtomatizirovannykh sistem upravleniya i proektirovaniya v stroitel'stve* [System approach during creation of complex automated control systems and design in construction]. *Nauchnoe obozrenie – Scientific review*, 2015, no. 16, pp. 461–464.

10. Yang J., Ogunkah I. A. Multi-Criteria Decision Support System for the Selection of Low-Cost Green Building Materials and Components. *Journal of Building Construction and Planning Research*, 2013, vol. 1, pp. 89–130.

11. Isaev A. V., Kuznetsov I. L. *Variantnost' kriteriev optimal'nosti pri sinteze ratsional'nogo konstruktivnogo resheniya na primere stal'nykh stropil'nykh ferm* [Criteria variability of optimality at synthesis of the rational constructive decision on the example of steel rafter farms]. *Izvestiya KazGASU – KSUA Bulletin*, 2009, no. 1 (11), pp. 92–98.

12. Vasil'kin A. A., Shcherbina S. V. *Avtomatizirovannoe reshenie zadachi opredeleniya optimal'noy vysoty stal'noy fermy po kriteriyu minimuma massy pri variatsii vysoty fermy* [Automated solution of the task of steel truss optimum height determination according to the criterion of minimum weight at the truss height variation]. *Trudy Mezhdunar.konf. 12–13 noyabrya 2014 g. «Integratsiya, partnerstvo i innovatsii v stroitel'noy nauke i obrazovanii»* [Proc. of the Int. sci. conf. November 12–13, 2014 "Integration, partnership and innovations in construction science and education"]. Moscow, MGSU Publ., 2015.

13. Vasil'kin A. A., Rakhmonov E. H. *Sistemotekhnika optimal'nogo proektirovaniya ehlementov stroitel'nykh konstruktsiy* [System engineering of optimum design of building constructions members]. *Inzhenernyy vestnik Dona – Engineering Bulletin of Don*, 2013, vol. 27, no. 4, p. 111.

14. Ibragimov A. M., Vasil'kin A. A. *Avtomatizirovannoe reshenie proektnykh zadach komponovki ob'emno-planirovochnogo resheniya skladskikh sooruzheniy. Ch. 1. Postanovka zadaniya* [Automated solution of configuration design problems of the space-planning solution of warehouse constructions. P.1. Statement of the task]. *Nauchnoe obozrenie – Scientific review*, 2016, no. 13, pp. 32–36.

15. Parlashkevich V. S., Vasil'kin A. A., Bulatov O. E. *Proektirovanie i raschet metallicheskh konstruktsiy. Ucheb. posobie* [Design and calculation of metal designs. Teaching manual]. Moscow, MGSU Publ., 2013.