

DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-345-352
УДК 624.11

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Концепция разработки программ автоматизированного проектирования мостовых или иных инженерных сооружений по задаваемому критерию оптимальности

П.М. Саламахин^{1*}, А.Д. Часовников²¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, 64²Научно-исследовательский институт мостов и гидротехнических сооружений, Российская Федерация, 129329, Москва, Изгарский пр-д, д. 2, стр. 1

*pavel-salamahin@mail.ru

История статьи:

Поступила в редакцию: 08 июля 2019 г.

Доработана: 01 октября 2019 г.

Принята к публикации: 10 октября 2019 г.

Аннотация

В статье на основе обобщения опыта создания в период с 1997 по 2015 год программ автоматизированного проектирования разнообразных мостовых сооружений пятнадцатью аспирантами кафедры мостов и транспортнх тоннелей МАДИ (ГТУ) под руководством д.т.н., профессора П.М. Саламахина предлагается концепция разработки структуры типовых программ автоматизированного проектирования мостовых или иных инженерных сооружений по задаваемому критерию оптимальности. Приводится в самом общем виде полная блок-схема таких программ с детальным раскрытием в ней работы индикатора одновременного выполнения комплекса требований во всех элементах сооружения с зависимыми размерами в ходе последовательного их приближения к минимально возможным значениям, а также демонстрируется способ определения комбинации значений всех независимых параметров сооружения, обеспечивающей проектирование сооружения по задаваемому критерию оптимальности. При работе над статьей учтены некоторые положения ранее проведенных исследований и состояние разработки автоматизации проектирования мостовых сооружений за рубежом. Авторы исходят из того, что предлагаемая концепция разработки программ автоматизированного проектирования мостовых и иных инженерных сооружений по задаваемому критерию оптимальности может и должна быть использована в качестве образца при разработке программ автоматизированного проектирования сооружений с различными обобщенными конструктивными схемами.

Ключевые слова: мостовые и инженерные сооружения; обобщенные конструктивные схемы; зависимые размеры и независимые их параметры; критерий оптимальности сооружения; автоматизированное проектирование; типовая блок-схема программ проектирования

Для цитирования

Саламахин П.М., Часовников А.Д. Концепция разработки программ автоматизированного проектирования мостовых или иных инженерных сооружений по задаваемому критерию оптимальности // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 345–352. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-345-352>

Введение

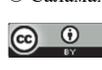
В настоящее время в проектных организациях Российской Федерации при проектировании мостовых сооружений для определения напряженно-

деформированного состояния в их элементах от совместного воздействия собственного их веса и максимально возможного воздействия временной нагрузки широко используются расчетные комплексы, основанные на использовании метода конечных элементов: Sophistic, Midas, Nastran и другие. При создании расчетной модели для проектируемого сооружения размеры его элементов с их использованием ориентировочно задают вручную без возможности их последующего автоматизированного изменения при дальнейшем расчете. Получаемые в этих случаях при расчете усилия и деформации в элементах сооружения строго со-

Саламахин Павел Михайлович, ведущий научный сотрудник, доктор технических наук, профессор, академик РАТ. eLIBRARY SPIN-код: 2596-3649. SCOPUS iD: 6504210104.

Часовников Антон Дмитриевич, ведущий инженер отдела обследования и испытаний мостов.

© Саламахин П.М., Часовников А.Д., 2019

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ответствуют заданным размерам, но заданные размеры сооружения могут не удовлетворять комплексу разнообразных требований: прочности, жесткости, местной или общей устойчивости, трещиностойкости и конструктивным требованиям. Это требует корректировки размеров сооружения методом последовательных приближений к необходимым минимально возможным размерам в ходе многошагового итерационного процесса вычислений с вновь автоматически задаваемыми размерами с целью обеспечения одновременного удовлетворения комплексу требований к размерам во всех элементах сооружения. Эффективный способ [1–4] определения момента одновременного удовлетворения комплексу требований во всех элементах мостовых сооружений с зависимыми размерами использовался по рекомендации доктора технических наук, профессора П.М. Саламахина аспирантами в МАДИ при разработке пятнадцати программ автоматизированного проектирования разнообразных автодорожных мостовых сооружений [5–19] и в их научных публикациях [20–25]. Эти способы в настоящее время не используются в известных, продаваемых на мировом рынке расчетных комплексах Sophistic, Midas, Nastran и других, рекомендуемых для проектирования разнообразных мостовых сооружений, что при их использовании не обеспечивает получение проектных решений с одинаковой надежностью их элементов. Кроме того, этими расчетными комплексами, рекомендуемыми на мировом рынке в качестве программ проектирования мостовых сооружений, не предусматривается оптимизация численных значений независимых параметров сооружения, при которых сооружения удовлетворяют задаваемому критерию их оптимальности. Обычно проектируются мостовые сооружения с произвольно назначаемыми значениями их независимых параметров, что не способствует получению экономически целесообразных решений.

Для того чтобы существующие расчетные комплексы могли быть использованы как эффективные программы автоматизированного проектирования экономически целесообразных конструктивных решений мостовых сооружений, их следует оснащать способами определения момента одновременного удовлетворения комплексу требований во всех элементах мостовых сооружений с зависимыми размерами и способом получения оптимальных комбинаций значений независимых параметров сооружения, соответствующих задаваемому критерию его оптимальности, что будет способствовать автоматизированному получению экономически целесообразных конструктивных ре-

шений. При анализе известных зарубежных работ [26–34] по автоматизации проектирования мостовых сооружений в работе [18] не выявлены эффективные способы оптимизации независимых параметров мостовых сооружений по задаваемому критерию оптимальности.

Основы создания типовых программ автоматизированного проектирования мостовых и иных инженерных сооружений по задаваемому критерию их оптимальности

1. Разработку программы автоматизированного проектирования мостового или иного инженерного сооружения следует начинать с создания обобщенной конструктивной схемы сооружения определенного его класса в виде графической модели возможных конструктивных решений, относящихся к одному классу сооружений. Класс мостовых конструкций объединяет множество их конструктивных решений, имеющих одинаковую конструктивную форму, но различающихся размерами и параметрами.

Обобщенная схема конструктивного решения моста определенного класса должна включать следующую информацию: возможные типы поперечных сечений пролетных строений, возможный тип решения элементов мостового полотна (одежда мостового полотна, перильное и защитное ограждение, деформационные швы).

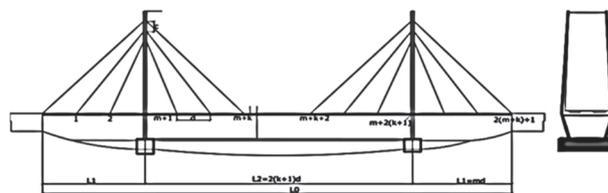


Рис. 1. Обобщенная конструктивная схема вантового моста [Figure 1. Generalized structural scheme of cable-stayed bridge]

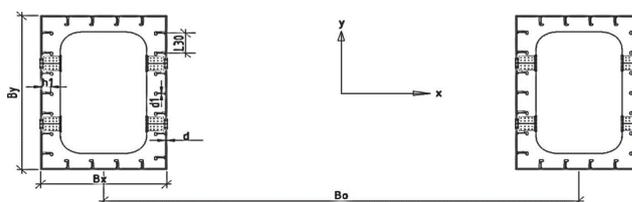


Рис. 2. Обобщенная конструктивная схема поперечного сечения пилонов вантового моста [Figure 2. Generalized structural scheme of cross-section of cable-stayed bridge pylons]

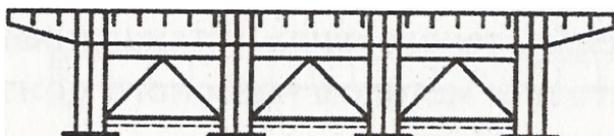


Рис. 3. Обобщенная конструктивная схема поперечного сечения балки жесткости вантового моста
[Figure 3. Generalized structural diagram of the cross-section of the cable-stayed bridge stiffness beam]

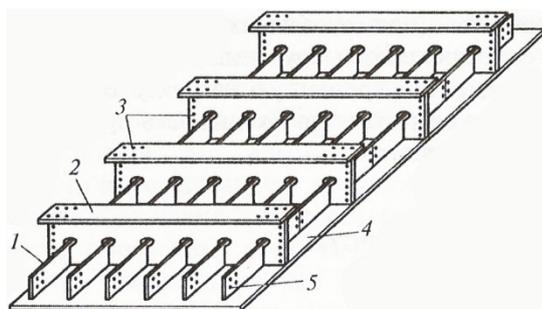


Рис. 4. Обобщенная конструктивная схема блока ортотропной плиты проезжей части на балке жесткости вантового моста
[Figure 4. Generalized structural diagram of the orthotropic slab of the carriageway block on the stiffness beam of the cable-stayed bridge]

2. На этапе разработки системы исходных данных необходимо определить полный перечень и содержание исходной информации, необходимой для проектирования моста, вписывающегося в принятую обобщенную конструктивную форму сооружения. В нее должны войти данные о требуемом габарите моста, о временных нагрузках, о материалах.

3. Определение перечня всех параметров и размеров сооружения, которые подлежат установлению и необходимы для выполнения чертежа проектируемого сооружения. При этом необходимо выделить среди них независимые размеры или параметры, так называемые переменные проектирования, и зависимые размеры, численные значения которых принимают единственное значение при заданной временной нагрузке и установленных значениях независимых параметров. Отличительной особенностью зависимых размеров является то, что для нахождения каждого из них имеется вполне

определенное условие прочности или комплекс условий (прочности, жесткости, местной или общей устойчивости, конструктивные требования).

Примеры зависимых размеров: толщина листа настила проезжей части зависит от расстояния между продольными балками, толщины стенок продольных и поперечных ребер проезжей части, стенок и размеров поясов поперечных и главных балок, зависящих от их высот.

Отличительной особенностью независимых параметров и размеров является то, что оптимальные их значения могут быть определены по общему для всех их условию: комплекс их значений должен обеспечить получение сооружения, удовлетворяющего критерию оптимальности.

Примерами независимых параметров и размеров сооружения являются: количество главных балок в поперечном сечении пролетного строения, расстояния между продольными и поперечными балками проезжей части, высоты главных и поперечных балок в сооружении.

При принятой системе независимых параметров поиск их оптимальных значений можно произвести с помощью организации циклов по изменению их численных значений, с тем чтобы найти такую комбинацию их значений, при которой, например, суммарная стоимость сооружения будет минимальной.

4. Определение перечня данных о результатах проектирования и способа их выдачи компьютером. К этому перечню обычно относят размеры всех элементов сооружения, данные о напряженно-деформированном состоянии всех элементов сооружения, технико-экономические показатели элементов и сооружения в целом.

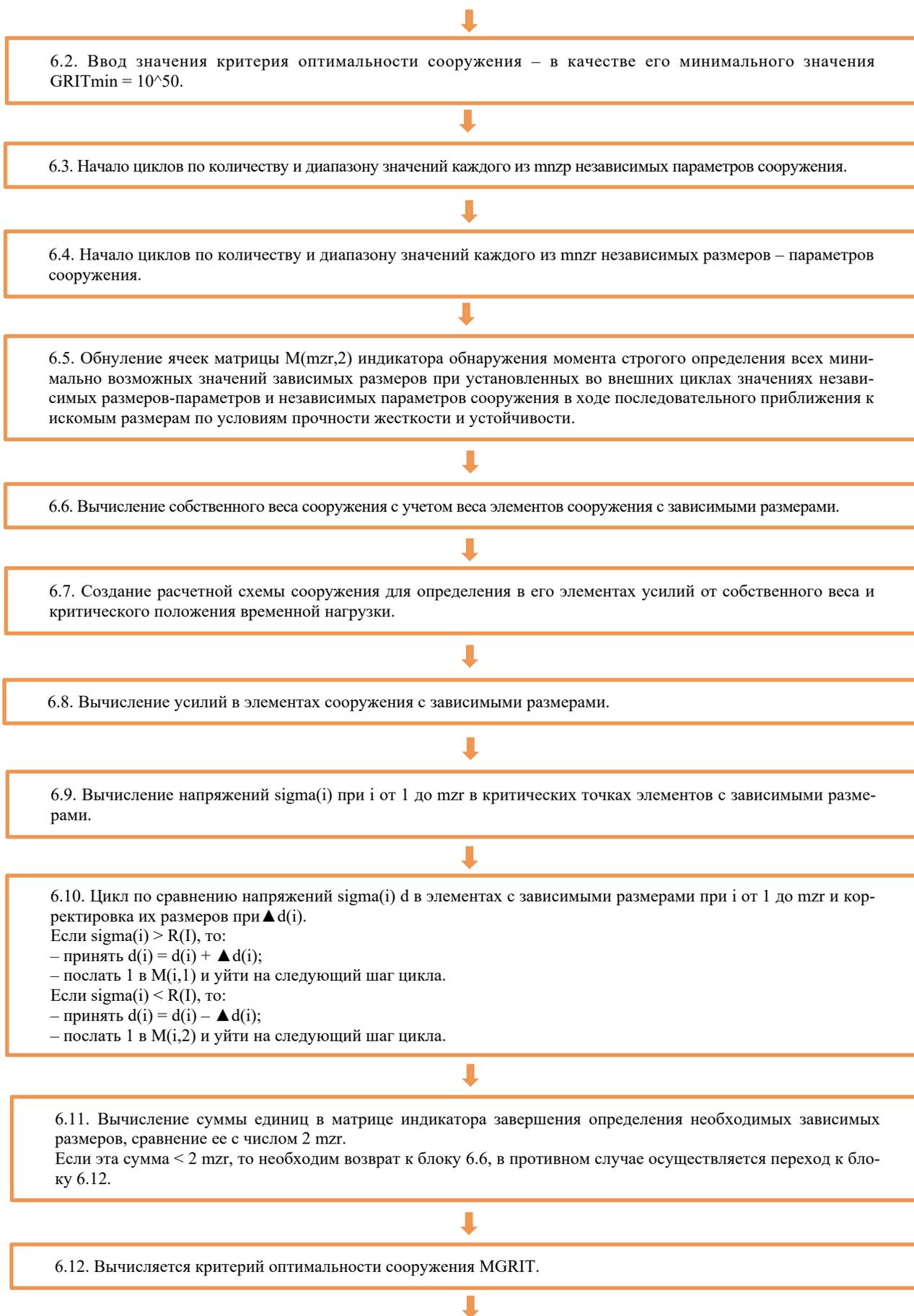
5. Разработка блок-схемы программы автоматизированного проектирования сооружения и самой программы с использованием предлагаемой в п. 6 типовой блок-схемы и учетом особенностей конструктивной формы проектируемого сооружения.

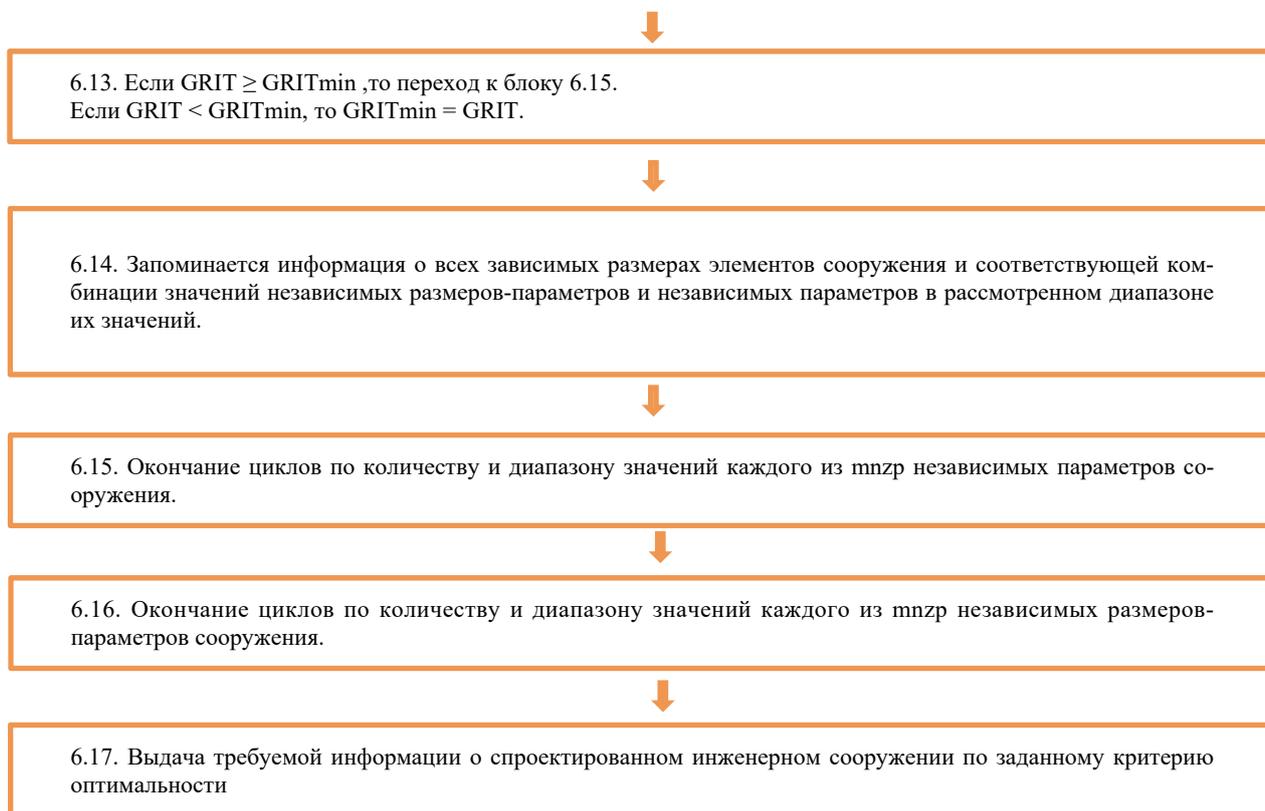
6. Типовая блок-схема программ автоматизированного проектирования мостовых или иных инженерных сооружений (см. 6.1–6.17).

6.1. Ввод системы исходных данных:

- количество зависимых размеров сооружения mzr ;
- количество независимых параметров – размеров $mnzr$;
- количество независимых параметров сооружения $mnpzr$;
- сведения о временных нагрузках;
- сведения об используемых материалах;
- сведения о начальных значениях зависимых размеров $d(i)$ элементов сооружения при I от 1 до mzr .







Заключение

Авторы считают, что предлагаемая блок-схема программ автоматизированного проектирования мостовых и иных инженерных сооружений может и должна быть использована в качестве образца при разработке программ автоматизированного проектирования сооружений с различными обобщенными конструктивными схемами по задаваемому критерию оптимальности.

Детализация блоков 6.6–6.8 предложенной блок-схемы должна производиться разработчиками программ с учетом особенностей обобщенной конструктивной схемы проектируемого сооружения.

Целью этой работы является стремление авторов создать основы концепции автоматизированного проектирования мостовых и иных инженерных сооружений по задаваемому критерию их оптимальности, последующее использование которой позволит проектировать экономически целесообразные мостовые и иные инженерные сооружения.

Список литературы

1. *Лианагама Джанака*. Разработка и обоснование рекомендаций по конструктивным решениям опор автодорожных мостов для условий Республики Шри-Ланка: дис. ... к.т.н. 1990. 136 с.

2. *Ле Тху Хьонг*. Оптимизация параметров пролетных строений висячих мостов при их проектировании с применением ПК: дис. ... к.т.н. 1999. 134 с.

3. *Новодзинский А.Л.* Совершенствование методики автоматизированного проектирования ортотропных плит проезжей части автодорожных мостов: дис. ... к.т.н. 2001. 166 с.

4. *Аует Луис*. Обоснование конструктивных форм и способов строительства автодорожных мостов в условиях Республики Конго: дис. ... к.т.н. 2002. 128 с.

5. *Фан Пинь*. Оптимизация гибкости сжатых элементов мостовых конструкций: дис. ... к.т.н. 2004. 152 с.

6. *Ализаде Шахрам Хое*. Оптимизация параметров двухпилонных металлических вантовых мостов при их автоматизированном проектировании с применением ПК: дис. ... к.т.н. 2003. 130 с.

7. *Нуен Нам Ха*. Автоматизация проектирования и оптимизация сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов: дис. ... к.т.н. 2006. 182 с.

8. *Нуен Тхак Куанг*. Совершенствование программы автоматизированного проектирования двухпилонных металлических вантовых мостов: дис. ... к.т.н. 2007. 141 с.

9. *Саламахин П.М., Ле Ван Мань*. Обобщенная конструктивная форма сталежелезобетонных двухпилонных вантовых автодорожных мостов и блок-схема программы автоматизации их проектирования // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2010. № 2. С. 60–65. URL: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/10894>

10. *Саламахин П.М., Чан Тхай Минь*. Обобщенная конструктивная форма трехпролетных металлических висячих автодорожных мостов и блок-схема програм-

мы автоматизации их проектирования // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2010. № 2. С. 65–71. URL: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/10895>

11. *Нгуен Мань Тхьонг*. Автоматизированное проектирование неразрезных металлических пролетных строений автодорожных мостов с ортотропной плитой проезжей части: дис. ... к.т.н. 2011. 155 с.

12. *Зьонг Тхе Ань*. Автоматизированное проектирование разрезных железобетонных пролетных строений с напрягаемой арматурой: дис. ... к.т.н. 2011. 150 с.

13. *Ле Мань Хан*. Автоматизированное проектирование разрезных железобетонных пролетных строений с ненапрягаемой арматурой: дис. ... к.т.н. 2011. 155 с.

14. *Зайяр Минь Шве*. Обоснование рациональных параметров сталежелезобетонных двухпилонных вантовых мостов с вантами по схеме «веер»: дис. ... к.т.н. 2013. 144 с.

15. *Реиетников И.В.* Обоснование рациональных конструктивно-технологических решений деревометалло-железобетонных пролетных строений автодорожных мостов: дис. ... к.т.н. 2015. 139 с.

16. *Нгуен Мань Тхьонг*. Оптимизация параметров неразрезных металлических пролетных строений автодорожных мостов с ортотропной плитой проезжей части // Вестник МАДИ. 2011. № 3 (26). С. 87–90.

17. *Нгуен Мань Тхьонг*. Основы программы автоматизированного проектирования неразрезных металлических пролетных строений автодорожных мостов с ортотропной плитой проезжей части // Инженерные системы – 2011: тезисы докладов (Москва, 5–8 апреля 2011 г.). М.: РУДН, 2011. С. 84–85.

18. *Нгуен Мань Тхьонг*. Обобщенная конструктивная форма неразрезных металлических пролетных строений автодорожных мостов с ортотропной плитой проезжей части и блок-схема программы автоматизации их проектирования // Исследования мостовых и тоннельных сооружений: сб. науч. тр. М.: МАДИ (ГТУ), 2010. С. 62–66.

19. *Тхьонг Нгуен Мань*. Оптимизация параметров коробчатых металлических пролетных строений // Наука и техника в дорожной отрасли. 2011. № 3. С. 32–33.

20. *Саламахин П.М.* Проектирование мостовых и строительных конструкций. М.: КноРус, 2011. С. 343–357.

21. *Саламахин П.М.* Автоматизированное проектирование металлических двухпилонных вантовых мостов // Транспортное строительство. 2003. № 10. С. 15–19.

22. *Саламахин П.М.* Проблемы и концепция автоматизации проектирования и оптимизации конструк-

ции мостов // Транспортное строительство. 2004. № 4. С. 20–23.

23. *Саламахин П.М.* Метод обобщения закономерностей веса несущих конструкций. М., 1977. 106 с.

24. *Саламахин П.М., Реиетников И.В.* К выбору рациональных конструктивных форм деревометалло-железобетонных пролетных строений автодорожных мостов // Наука и техника в дорожной отрасли. 2014. № 3. С. 45–48.

25. *Клевко В.И., Мусеева О.В., Новодзинский А.И.* Выбор оптимального грунта засыпки подземного пешеходного перехода из металлических гофрированных конструкций // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 1. С. 102–114.

26. *Baldomir A., Hernandez S., Nieto F., Jurado J.A.* Cable optimization of a long span cable stayed bridge in La Coruña (Spain) // Advances in Structural Optimization. 2010. Vol. 41. Issues 7–8. Pp. 931–938. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997810000517>.

27. *Ashraf El Damatty, Olfat Sarhang Zadeh.* Comparison between three types of cable-stayed bridges using structural optimization. Canada: University of Western Ontario, 2012.

28. *Faella C., Martinell E., Nigro E.* Steel and concrete composite beams with flexible shear connection: “exact” analytical expression of the stiffness matrix and application // Computer & Struct. 2002. Vol. 80. No. 11. Pp. 1001–1009. DOI: 10.1016/S0045-7949(02)00038-X.

29. *Reddy J.N.* An introduction to the finite element method. McGraw Hill, International Edition, 1991.

30. *Simes L.M.C., Negro J.H.J.O.* Optimization of cable-stayed bridges with box-gridder decks // Advances in Engineering Software. 2000. Vol. 31(6). Pp. 417–423. DOI: 10.1016/0965-9978(00)00003-X.

31. *Manabu Ito, Yozo Fujino, Toshio Miyata, Nobuyuki Narita.* Cable-stayed bridges recent developments and their future. Amsterdam – London – New York – Tokyo, 1991.

32. *Podolny W., Scalzi J.B.* Construction and design of cable-stayed bridges. New York, 1986.

33. *Tao Zhang, Zhi Min Wu.* Dead load analysis of cable-stayed bridges // International Conference on Intelligent Building and Management. 2011. Pp. 270–274.

34. *Yu Chi Sung, Dyi Wei Chang, Eng Huat Teo.* Optimum post tensioning cable forces of Mau-Lo Hsi cable-stayed bridges // Engineering Structures. 2006. Vol. 28. No. 10. Pp. 1407–1417.

RESEARCH PAPER

The concept of development of computer aided design programs for bridges or other engineering structures according to the specified criterion of optimality

Pavel M. Salamakhin^{1*}, Anton D. Chasovnikov²

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation

²Research Institute of Bridges and Hydraulic Engineering Structures, 2 Igarskii proezd, bldg. 1, Moscow, 129329, Russian Federation

*pavel-salamahin@mail.ru

Article history:

Received: July 08, 2019

Revised: October 01, 2019

Accepted: October 10, 2019

Abstract

In article on the basis of generalization of experience of creating in the period from 1997 to 2015 computer-aided design of various bridge structures by fifteen graduate students of the Department of Bridges and Transport Tunnels MADI (GTU)

For citation

Salamakhin P.M., Chasovnikov A.D. (2019). The concept of development of computer aided design programs for bridges or other engineering structures according to the specified criterion of optimality. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 345–352. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-345-352>. (In Russ.)

under the leadership of Doctor of Technical Sciences, Professor P.M. Salamakhin the authors proposed the concept of the development of the structure of standard programs of computer-aided design of bridge or other engineering structures according to the given optimality criterion. Given in the most general form of the complete block diagram of such programs with the detailed disclosure of the indicator of simultaneous execution of a set of requirements in all elements of the structure dependent scale in the sequential approach the minimum possible values, and also demonstrates how to determine the combination of values of all independent parameters of structures that provide the design of facilities according to the given optimality criterion. When working on the article, some provisions of earlier studies and the state of development of automation of design of bridge structures abroad are taken into account. The authors proceed from the fact that the proposed concept of development of computer-aided design of bridge and other engineering structures according to the specified criterion of optimality can and should be used as a model in the development of computer-aided design of structures with various generalized design schemes.

Keywords: bridge and other engineering structures; generalized design schemes; dependent dimensions and their independent parameters; specified criteria of optimality of the structure; automated design; typical block diagram of design programs

References

1. Liyanagama. Dzhana. (1990). *Razrabotka i obosnovanie rekomendacij po konstruktivnym resheniyam opor avtodorozhnyh mostov dlya uslovij Respubliki Shri-Lanka* [Development and justification of recommendations on structural solutions of road bridge supports for the conditions of the Republic of Sri Lanka] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

2. Le Thu Hyong. (1999). *Optimizaciya parametrov proletnyh stroenij visyachih mostov pri ih proektirovanii s primeneniem PK* [Optimization of parameters of span structures of suspension bridges in their design with the use of PC] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

3. Novodzinskij A.L. (2001). *Sovershenstvovanie metodiki avtomatizirovannogo proektirovaniya ortotropnyh plit proezzhej chasti avtodorozhnyh mostov* [Improved methods of computer-aided design of orthotropic plates roadway of highway bridges] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

4. Auet Luis. (2002). *Obosnovanie konstruktivnyh form i sposobov stroitel'stva avtodorozhnyh mostov v usloviyah Respubliki Kongo* [Justification of structural forms and methods of construction of road bridges in the Republic of the Congo] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

5. Fan Pin'. (2004). *Optimizaciya gibkosti szhatyh elementov mostovyh konstrukcij* [Optimization of flexibility of compressed elements of bridge structures] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

6. Alizade Shahram Hoe. (2003). *Optimizaciya parametrov dvuhpilonyh metallicheskih vantovyh mostov pri ih avtomatizirovannom proektirovanii s primeneniem PK*

[Optimization of parameters of double-pylon metal cable-stayed bridges at their computer-aided design with the use of PC] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

7. Nguen Nam Ha. (2006). *Avtomatizaciya proektirovaniya i optimizaciya stalezhelezobetonnyh proletnyh stroenij avtodorozhnyh mostov* [Design automation and optimization of steel-reinforced concrete spans of road bridges] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

8. Nguen Thak Kuang. (2007). *Sovershenstvovanie programmy avtomatizirovannogo proektirovaniya dvuhpilonyh metallicheskih vantovyh mostov* [Improvement of the program of computer-aided design of double-pylon metal cable-stayed bridges] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

9. Salamahin P.M., Le Van Manh. (2010). The generalized constructive form of two-pylon cable-stayed composite bridges and the flow-chart of program of their design optimization. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings], (2), 60–65. URL: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/10894>. (In Russ.)

10. Salamahin P.M., Tran Thai Minh. (2010). The generalized constructive form of three-span steel suspension bridges and the flow chart of the program of their design optimization. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings], (2), 65–71. URL: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/10895>. (In Russ.)

11. Nguen Man' Thyong. (2011). *Avtomatizirovannoe proektirovanie nerazreznnyh metallicheskih proletnyh stroenij avtodorozhnyh mostov s ortotropnoj plitoy proezzhej chasti* [Computer-aided design of continuous metal spans of road bridges with orthotropic plate of the roadway] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

12. Zyont The An'. (2011). *Avtomatizirovannoe proektirovanie razreznnyh zhelezobetonnyh proletnyh stroenij s napryagaemoj armaturoj* [Computer-aided design of single-span reinforced concrete superstructures with ten-

Pavel M. Salamakhin, leading researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor, member of the Russian Academy of Transport. eLIBRARY SPIN-code: 2596-3649. SCOPUS iD: 6504210104.

Anton D. Chasovnikov, lead engineer of Bridge Inspection and Testing Department.

sioned reinforcement] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

13. Le Man' Han. (2011). *Avtomatizirovannoe proektirovanie razreznykh zhelezobetonnykh proletnykh stroenij s nenapryagaemoj armaturoj* [Computer-aided design of single-span reinforced concrete superstructures with non-stressed reinforcement] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

14. Zajyar Min' Shve. (2013). *Obosnovanie racional'nykh parametrov stalezhelezobetonnykh dvuhpilonnnykh vantovykh mostov s vantami po scheme "veer"* [Justification of rational parameters of steel-reinforced concrete double-pylon cable-stayed bridges with "fan" cables] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

15. Reshetnikov I.V. (2015). *Obosnovanie racional'nykh konstruktivno-tehnologicheskikh reshenij derevometallozhelezobetonnykh proletnykh stroenij avtodorozhnykh mostov* [Substantiation of rational constructive and technological solutions of wood-metal-concrete spans of road bridges] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

16. Nguen Man' Thyong. (2011). Optimizaciya parametrov nerazreznykh metallicheskih proletnykh stroenij avtodorozhnykh mostov s ortotropnoj plitoy proezzhej chasti [Optimization of parameters of continuous metal spans of road bridges with orthotropic plate of the roadway]. *Vestnik MADI*, 3(26), 87–90. (In Russ.)

17. Nguen Man' Thyong. (2011). Osnovy programmy avtomatizirovannogo proektirovaniya nerazreznykh metallicheskih proletnykh stroenij avtodorozhnykh mostov s ortotropnoj plitoy proezzhej chasti [Fundamentals of the software for of computer-aided design of continuous metal spans of road bridges with orthotropic plate of the roadway]. *Engineering Systems – 2011: Tezisy dokladov* (pp. 84–85). Moscow. (In Russ.)

18. Nguen Man' Thyong. (2010). Obobshchennaya konstruktivnaya forma nerazreznykh metallicheskih proletnykh stroenij avtodorozhnykh mostov s ortotropnoj plitoy proezzhej chasti i blok-skhemata programmy avtomatizacii ih proektirovaniya [Generalized structural form of continuous metal spans of road bridges with orthotropic plate projections of flowchart elements and design programs]. *Issledovaniya mostovykh i tonnel'nykh sooruzhenij: sb. nauch. tr.* (pp. 62–66). Moscow: MADI Publ. (In Russ.)

19. Thyong Nguen Man'. (2011). Optimizaciya parametrov korobchatykh metallicheskih proletnykh stroenij [Optimization of box-shaped metal span parameters]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli* [Science and Engineering for Highways], (3), 32–33. (In Russ.)

20. Salamakhin P.M. (2011). *Proektirovanie mostovykh i stroitel'nykh konstrukcij* [Design of bridges and building constructions] (pp. 343–357). Moscow: KnoRus Publ. (In Russ.)

21. Salamakhin P.M. (2003). Avtomatizirovannoe proektirovanie metallicheskih dvuhpilonnnykh vantovykh mostov [Automated designing two-pylon metal cable-stayed bridges]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction], (10), 15–19 (In Russ.)

22. Salamakhin P.M. (2004). Problemy i koncepciya avtomatizacii proektirovaniya i optimizacii konstrukcii mostov [Problems and concept of automation of design and optimization of bridges]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction], (4), 20–23. (In Russ.)

23. Salamakhin P.M. (1977). *Metod obobshcheniya zakonomernostej vesa nesushchih konstrukcij* [Method of generalization of weight regularities of load-bearing structures]. Moscow. (In Russ.)

24. Salamakhin P.M., Reshetnikov I.V. (2014). K vyboru racional'nykh konstruktivnykh form derevometallozhelezobetonnykh proletnykh stroenij avtodorozhnykh mostov [Choice of rational forms of road bridge woodsteelconcrete spans]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli* [Science and Engineering for Highways], (3), 45–48. (In Russ.)

25. Kleveko V.I., Moiseeva O.V., Novodzinskij A.L. (2017). Vybora optimal'nogo grunta zasypki podzemnogo peshekhodnogo perekhoda iz metallicheskih gofrirovannykh konstrukcij [Selecting an optimal backfilling for underground pedestrian crossings from corrugated metal structures]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arhitektura* [PNRPU Construction and Architecture Bulletin], 8(1), 102–114. (In Russ.)

26. Baldomir A., Hernandez S., Nieto F., Jurado J.A. (2010). Cable optimization of a long span cable stayed bridge in La Coruña (Spain). *Advances in Structural Optimization*, 41(7–8), 931–938. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997810000517>

27. Ashraf El Damatty, Olfat Sarhang Zadeh. (2012). *Comparison between three types of cable-stayed bridges using structural optimization*. University of Western Ontario, Canada.

28. Faella C., Martinell E., Nigro E. (2002). Steel and concrete composite beams with flexible shear connection: "exact" analytical expression of the stiffness matrix and application. *Computer & Struct.*, 80(11), 1001–1009. DOI: 10.1016/S0045-7949(02)00038-X

29. Reddy J.N. (1991). *An introduction to the finite element method*. McGraw Hill, International Edition.

30. Simes L.M.C., Negro J.H.J.O. (2000). Optimization of cable-stayed bridges with box-gridder decks. *Advances in Engineering Software*, 31(6), 417–423. DOI: 10.1016/0965-9978(00)00003-X

31. Manabu Ito, Yozo Fujino, Toshio Miyata, Nobuyuki Narita. (1991). *Cable-stayed bridges recent developments and their future*. Amsterdam – London – New York – Tokyo.

32. Podolny W., Scalzi J.B. (1986). *Construction and design of cable-stayed bridges*. New York.

33. Tao Zhang, Zhi Min Wu. (2011). Dead load analysis of cable stayed bridges. *International Conference on Intelligent Building and Management*, 270–274.

34. Yu Chi Sung, Dyi Wei Chang, Eng Huat Teo. (2006). Optimum post tensioning cable forces of Mau-Lo Hsi cable-stayed bridges. *Engineering Structures*, 28(10), 1407–1417.