

## Применение управляемых затяжек в адаптивных конструкциях

© М.В. Астахов, Е.В. Грачева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, 248000, Россия

*Рассмотрено применение принципов теории автоматического управления для проектирования адаптивных конструкций, в частности принципа управления по возмущению. Исходя из анализа конструкции-прототипа строится ее информационно-математическая модель или система, на основе которой с помощью изменения возмущающих и управляющих воздействий может быть создан артефакт (искусственный материальный комплекс вместе с признаками его действия). Механизм, который изменяет вектор возмущающих воздействий в артефакте, можно считать актуатором, анализирующим состояние спроектированной конструкции в процессе ее эксплуатации и способным изменять предельное или нерасчетное состояние артефакта путем внешних воздействий.*

*Предложены два типа актуатора для систем рамного и балочного типов. Приведена конструкция актуаторов на основе почти мгновенно изменяемых систем, содержащих квазимеханизмы в виде силовых конструкций и реализующих принцип управления по возмущению. Обсуждается создание универсального актуатора балочного типа на основе металлокомпозитной сэндвичевой плиты с элементами почти мгновенно изменяемой системы.*

**Ключевые слова:** квазимеханизм, адаптивная конструкция, управляемая затяжка, почти мгновенно изменяемая система, актуатор, напряженно-деформированное состояние

**Введение.** В настоящее время большое внимание уделяют созданию адаптивных конструкций. Их еще называют управляемыми, регулируемыми, smart-конструкциями, умными, метаморфными, чувствительными и т. п. [1–4]. Идея инженеров проста. Адаптивная конструкция должна избегать аварий и катастроф с помощью некоего механизма воздействия на основную конструкцию. Называется такой механизм актуатором. Он сигнализирует об ожидаемом неблагоприятном событии и автоматически прекращает его при превышении определенных значений [5–7].

С появлением различного вида датчиков и анализаторов, контролирующих состояние конструкции, создание механизма обратной связи для актуатора не представляет затруднений [8]. Другое дело — обеспечить экономическую эффективность новых адаптивных механизмов, их эксплуатационную надежность и требуемые размеры.

Для дорогостоящих крупногабаритных единичных конструкций (например, мостов, зданий аэропортов, больших стадионов, ангаров и цехов авиа- и судостроительных заводов) такие механизмы были созданы. Однако для большинства машин и сооружений адаптивные системы не были приняты в эксплуатацию.

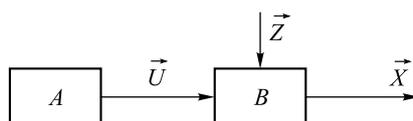
В некоторых отраслях техники (в частности, в конструкциях, испытывающих вибрацию) адаптивные устройства стали использовать чаще. В то же время в машинах и сооружениях, испытывающих малоцикловую периодическую нагрузку достаточно большой амплитуды или случайные превышения предельной нагрузки, современные адаптивные устройства не получили широкого применения. Это объясняется главным образом исключительностью и инерционностью действия таких устройств (замедленностью их реакции на внешнее возмущение).

Цель данного исследования — разработка (на основе принципов теории управления) такого адаптивного устройства, которое, находясь одновременно с главной несущей конструкцией в напряженно-деформированном состоянии (НДС), изменяющемся во времени в циклическом режиме, может автоматически снижать уровень максимальных напряжений и, как следствие, повышать ее ресурс.

**Анализ применения принципов теории автоматического управления для проектирования адаптивных конструкций.** При создании конструкции инженер включает в проектировочный расчет предполагаемые законы изменения ее отклика на действие внешних возмущающих факторов (внешней нагрузки, температуры, смещений опор, коррозии и др.). По существу еще до изготовления конструкции разрабатывается алгоритм ее поведения при эксплуатации [9] и закладывается некая предварительная программа ответа конструкции на внешние возмущающие факторы. Эти закономерности, выраженные в виде аналитических зависимостей, далее предлагается называть системой, представляющей собой информационно-математическую модель рассматриваемой конструкции.

С помощью теории автоматического управления процесс проектирования любой конструкции можно построить как процесс управления системой на основе трех принципов: разомкнутого управления, управления с обратной связью и управления по возмущению (принцип компенсации) [10].

*Принцип разомкнутого управления* при проектировании можно описать блок-схемой, представленной на рис. 1. Блок *A* на ней назовем артефактом [10], представляющим прототип конструкции, параметры которой в процессе проектирования будут изменяться. В состав блока *A* входят задатчик программы и управляющее устройство [10].



**Рис. 1.** Блок-схема, описывающая принцип разомкнутого управления при проектировании конструкций

Блок  $B$  — выходной элемент, являющийся системой, при влиянии на которую векторами  $\vec{U}$  (управляющие воздействия, т. е. вариативно изменяемые исходные параметры системы на основе артефакта — прототипа конструкции) и  $\vec{Z}$  (возмущающие воздействия, т. е., например, переменные во времени внешние силы) получаем вектор  $\vec{X}$  (допустим, вектор внутренних сил, действующих в контрольных сечениях системы).

По сути это обычный расчет на прочность, в котором векторы  $\vec{U}$  и  $\vec{Z}$  задает проектировщик [11].

При использовании принципа управления с обратной связью (в нашем случае это управление проектированием) в схему (см. рис. 1) включают блоки получения и обработки экспериментальных данных. Этот принцип управления не требует подробного рассмотрения.

Наибольший интерес представляет блок-схема проектирования, называемая управлением по возмущению (рис. 2), в которой, наряду с блоками, приведенными на рис. 1, имеются новые: блок  $C$  генерации новых управляющих воздействий  $\vec{U}_2$ ; сумматор  $\Sigma$ , изменяющий  $\vec{U}_1$  с учетом  $\vec{U}_2$  и  $\vec{Z}$ .

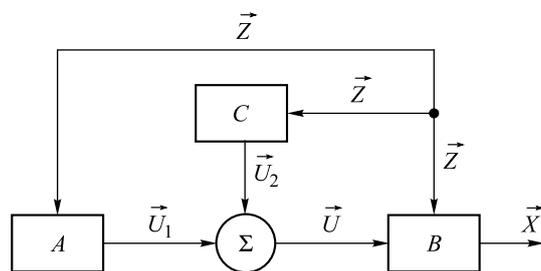


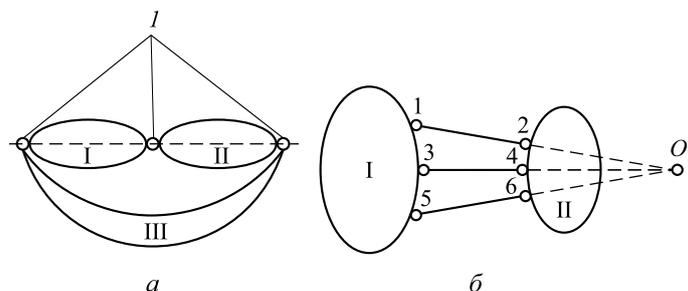
Рис. 2. Блок-схема, описывающая принцип управления по возмущению при проектировании и эксплуатации конструкций

Следует отметить, что блок-схема с использованием управления по возмущению (см. рис. 2) может быть реализована не только при проектировании, но и при эксплуатации уже созданной машины. В этом случае вектор  $\vec{X}$  внутренних сил зависит как от параметров артефакта  $A$ , так и от возмущающих воздействий  $\vec{Z}$ , влияющих и на систему, и на вновь спроектированный и изготовленный артефакт.

Для реализации влияния вектора  $\vec{Z}$  на артефакт необходимо предусмотреть управляющее устройство (актуатор), которое каким-либо образом изменяет силовые параметры, действующие на конструкцию. Это устройство должно быть практически безынерционным и чувствительным к незначительным изменениям внешних возмуще-

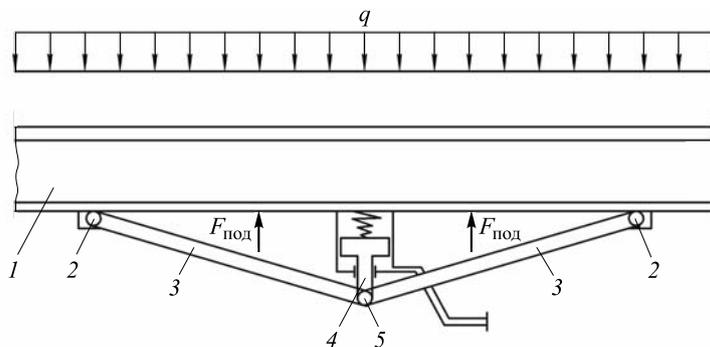
ний, при этом оно должно создавать довольно большие контрвозмущения, способные повлиять на систему так, чтобы ее отклонения не превышали заданных значений.

Большие силовые воздействия можно получить с помощью квазимеханизмов, построенных на основе мгновенно изменяемых систем (рис. 3).



**Рис. 3.** Трехзвенная (а) и пятизвенная (б) мгновенно изменяемые системы:  
 I — шарнир; I–III — диски; 1–2, 3–4, 5–6 — стержни мгновенно изменяемой системы

Рассмотрим пример актуатора (рис. 4), представляющего собой почти мгновенно изменяемую систему, которая получена из трехзвенной мгновенно изменяемой системы (рис. 3, а) путем поворота дисков I и II на небольшой угол относительно друг друга, и корректирующего НДС лонжерона рамы прицепа в зависимости от внешней нагрузки [11].



**Рис. 4.** Устройство управления НДС рамы прицепа с помощью актуатора рычажного типа:

$q$  — внешняя нагрузка от платформы прицепа;  $F_{\text{под}}$  — нагрузка от подъемника;  
 1 — лонжерон рамы; 2, 5 — шарниры; 3 — штанга; 4 — гидроцилиндр

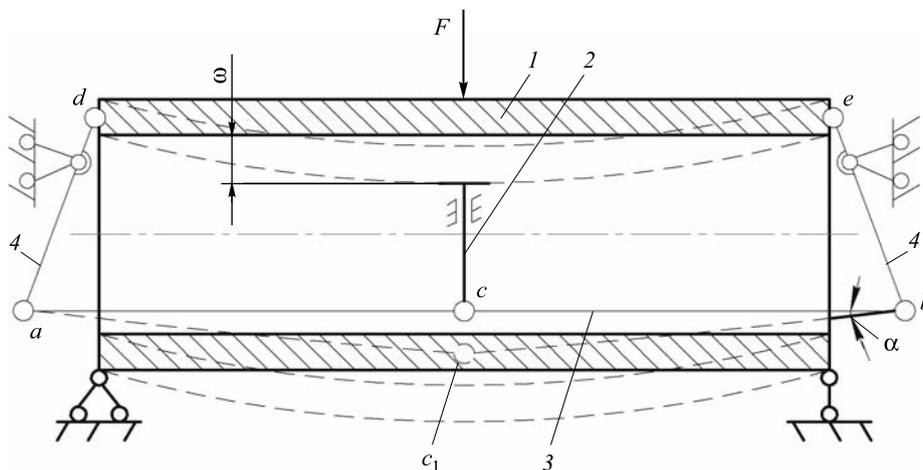
В работе [11] предлагается управлять значением сжимающих сил в пределах наиболее нагруженного участка изгибаемого элемента (лонжерона 1 рамы прицепа (см. рис. 4)), прикладывая вдоль сжатой зоны силу противоположного знака, причем напряжения от изгиба

несущего элемента компенсируются напряжениями, возникающими от создаваемых актуатором сил. Он может быть выполнен в виде двух штанг 3, соединенных с проушинами на концах участка и между собой шарнирами 2, 5. Угол между штангами близок к  $180^\circ$ , но на  $2...4^\circ$  меньше него, чем достигается построение почти мгновенно изменяемой системы (см. рис. 3, а), т. е. появляется возможность при небольших нормальных силах, возникающих в шарнире 5 от действия гидроцилиндра 4, получить значительные силы в шарнирах 2, влияющие на НДС лонжерона 1.

Рассматриваемая система обладает определенной инерционностью действия, распространяющейся от вала отбора мощности через гидростанцию и до шарниров 2, что несущественно при довольно медленной работе подъемного механизма кузова прицепа.

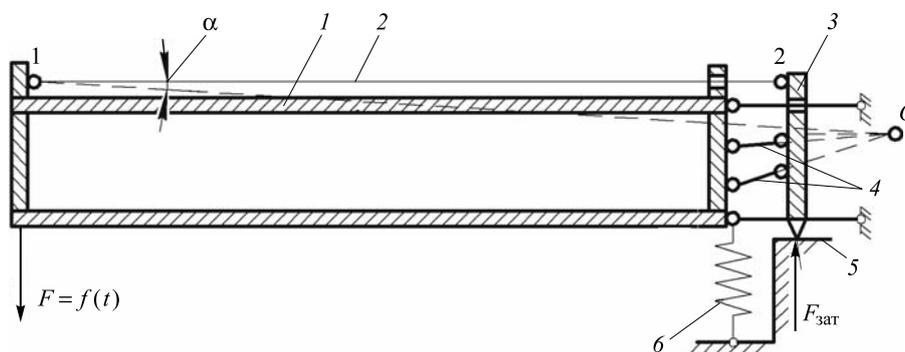
При эксплуатации многих машин наблюдаются большие ускорения звеньев, а значит, динамические силы в них быстро изменяются. В этом случае необходимо исключать промежуточные механизмы создания управляющей силы, хотя идея применения почти мгновенно изменяемых систем достаточно эффективна, особенно для малоциклового нагружения.

Так, в работе [12] в качестве главной несущей конструкции предлагаются элементы двухопорной (рис. 5) и консольной (рис. 6) балок, которые содержат почти мгновенно изменяемые системы — актуаторы, представляющие собой управляемые затяжки [10].



**Рис. 5.** Двухопорная балка с управляемыми затяжками (штриховыми линиями показано состояние системы при искривлении балки под действием силы  $F$ ):

1 — балка; 2 — управляющий стержень; 3 — стержень почти мгновенно изменяемой системы (струна); 4 — рычаг



**Рис. 6.** Консольная балка с управляемыми затяжками (1, 2 — номера роликов):  
1 — балка; 2 — трос; 3 — плашка; 4 — стержень; 5 — опора; 6 — опорная пружина

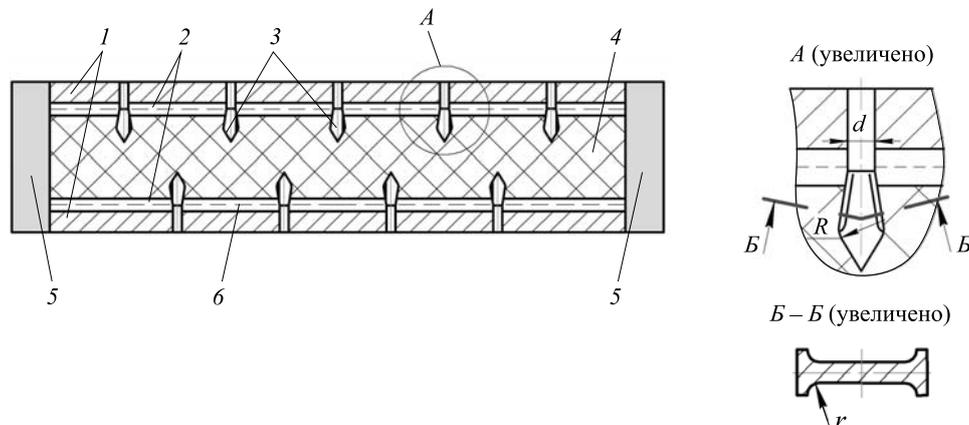
При искривлении двухопорной балки  $1$  (см. рис. 5) точка приложения силы  $F$  перемещается вниз, внутренняя часть верхнего пояса балки упирается в стержень  $2$ , в результате чего элементы  $ac$  и  $cb$  растягиваются и переходят в положение  $ac_1$  и  $bc_1$ , срабатывают рычаги  $4$  и верхний пояс частично растягивается, чем разгружается от сжимающих сил.

При искривлении консольной балки (см. рис. 6) в правой опоре  $5$  происходит осадка балки  $1$  от действия сил  $F = f(t)$  с деформацией пружины  $6$  жесткостью  $k$ , в результате на плашку  $3$  действует реактивная сила  $F_{\text{зат}}$  затяжки, стержни  $4$  и трос  $2$  работают как элементы  $1-2$ ,  $3-4$ ,  $5-6$  почти мгновенно изменяемой системы (см. рис. 3, б). Трос  $2$  (см. рис. 6) натягивается, сжимает верхний пояс балки и разгружает его от растягивающих сил.

В механизмах машиностроительных конструкций довольно часто встречаются рамы, состоящие из двухопорных и консольных балок, что дает возможность использовать балки с актуаторами (см. рис. 5 и 6) как составные элементы данных рамных систем.

Несмотря на кажущуюся простоту, эти балки, предлагаемые как стандартные для построения различного типа балочных и рамных систем, достаточно сложны. Кроме того, в связи с введением дополнительных структурных элементов они уменьшают надежность конструкции в целом.

**Разработка универсального конструкционного элемента со встроенным актуатором.** Авторы предлагают выполнить конструкционный элемент, универсальный для построения силовых систем балочного или рамного типа, в виде балочной сэндвичевой системы, которая состоит из двух пластин металла и плиты композита, связанных между собой на основе клеештифтовых (трансверсальных) соединений, включающих крепежные элементы (рис. 7) [13].



**Рис. 7.** Универсальный конструктивный элемент для управления собственным НДС: 1 — металлическая пластина; 2 — пластиковая трубка, в которой находится металлическая или композитная нить; 3 — копьсообразный цилиндрический штифт (крепежный элемент); 4 — плита из полимерного композиционного материала; 5 — установочно-регулирующий замок (управляющее устройство — актуатор); 6 — нить, условно обозначенная штриховой линией

Внешняя нагрузка, действующая на конструкцию, должна быть такой чтобы предлагаемый универсальный элемент (звено) находился в напряженном состоянии изгиба без кручения или растяжения-сжатия.

Исходя из этого управляющее устройство 5, включающее в себя почти мгновенно изменяемую систему с управляемой затяжкой (на рис. 7 виден только один элемент затяжки — растягиваемый), активирует либо верхнюю нить затяжки, либо нижнюю, либо одновременно обе нити и управляет таким образом НДС этого звена.

В работе [10] рассматриваются другие типы актуаторов, использующие не внутреннюю энергию деформации основной конструкции, а внешние энергетические источники, связанные с работой проектируемой машины (пневмосистему тормозов автомобиля, гидросистему самосвального транспортного средства и т. п.). Главный их недостаток — специализация по типу машины. Разработка универсального структурного элемента со встроенным актуатором, использующим энергию упругого деформирования основной конструкции создаваемого артефакта, весьма перспективна.

Следует отметить, что предложенные актуаторы на основе управляемых затяжек (см. рис. 5 и 6) были изготовлены в металле и испытаны на воздействие внешних сил. Экспериментальные исследования показали значительное увеличение несущей способности рассматриваемых артефактов [14].

**Заключение.** Применение актуаторов в виде управляемых затяжек для снижения уровня переменных во времени внутренних сил в конструкциях позволяет увеличить ресурс звеньев машин и элементов сооружений, работающих в малоцикловом режиме или подвер-

гающихся действию внезапно приложенной нерасчетной внешней нагрузки. Для повышения надежности проектируемой конструкции небольшим увеличением материалоемкости и усложнением структуры применяемой системы можно пренебречь. Массу конструкции следует уменьшить путем использования новых материалов.

Общим отрицательным свойством современных актуаторов является их эксклюзивность для каждого типа конструкций. Именно поэтому в данной работе авторы обсуждают вопрос создания универсального звена, включающего в себя актуатор, которое можно применять во многих технических устройствах в виде элементов главных несущих конструкций, работающих в малоцикловом режиме нагружения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wadhawan V.K. *Smart structures: blurring the distinction between the living and the nonliving*. Oxford, Oxford University Press, 2007, 368 p.
- [2] Chopra I., Sirohi J. *Smart Structures Theory*. United Kingdom, Cambridge University Press, 2013, 920 p.
- [3] Абовский Н.П. К развитию управляемых конструкций. *Строительство. Известия высших учебных заведений*, 1994, № 11, с. 4–19.
- [4] Irschik H., Nader M. Actuator placement in static bending of smart beams utilizing Mohr's analogy. *Engineering Structures*, 2009, vol. 31 (8), pp. 1698–1706.
- [5] Волков А.А. Управляемые конструкции. *Вестник МГСУ*, 2009, № 2, с. 194–198.
- [6] Inoue F. Development of adaptive construction structure by variable geometry truss. *Proceedings of International Symposium Shell and Spatial Structures-Architectural Engineering-Towards the future looking to the past*. Venice, Italy, September 2007, vol. 3–6, pp. 253–272.
- [7] Saeed N.M., *Prestress and Deformation Control in Flexible Structures*. PhD Thesis, Cardiff University, 2014, 292 p.
- [8] Varadan V.K., Vinoy K.J., Gopalakrishnan S. *Smart Material Systems and MEMS: Design and Development Methodologies*. Chichester: England. Hoboken, NJ John Wiley & Sons, 2006, 418 p.
- [9] Ковырягин М.А. *Регулирование напряженно-деформированного состояния и динамического поведения элементов конструкций*. Саратов, Изд-во СГТУ, 2006, 138 с.
- [10] Астахов М.В. *Управление проектированием*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 360 с.
- [11] Астахов М.В., Дикарев В.В. (СССР) *Подъемная платформа самосвального транспортного средства*. А.с. 1475843 СССР, МКИ В60 Р1/28, В62Д21/00 (СССР). № 4270894/30-11, опубли. 30.04.89, бюл. № 16, 3 с.
- [12] Астахов М.В., Тюрин Е.А. Снижение материалоемкости и повышение ресурса машин с помощью управляемых затяжек. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*, 2007, № 6, с. 32–33.
- [13] Сорокина И.И., Астахов М.В. Исследование влияния формы крепежного элемента на прочность соединения «металл – композит». *Наука и образование*, 2012, № 2.  
URL: <http://technomag.edu.ru/doc/308514.html> (дата обращения 30.10.2016).
- [14] Тюрин Е.А. *Технология снижения материалоемкости сельскохозяйственных машин с помощью систем управляемых затяжек*. Дис. ... канд. техн. наук. Калуга, 2007, 200 с.

Статья поступила в редакцию 28.12.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Астахов М.В., Грачева Е.В. Применение управляемых затяжек в адаптивных конструкциях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 2.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1727>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на Международной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики ФАРМ–2017», посвященной 170-летию со дня рождения великого русского ученого Николая Егоровича Жуковского, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 октября 2017 г.*

**Астахов Михаил Владимирович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теоретическая механика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [mvastahov@gmail.com](mailto:mvastahov@gmail.com)

**Грачева Екатерина Викторовна** — ассистент кафедры «Теоретическая механика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [gracheva.e@rambler.ru](mailto:gracheva.e@rambler.ru)

## Application of controlled joining beams in adaptive designs

© M.V. Astakhov, E.V. Gracheva

Bauman Moscow State Technical University,  
Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

*The article considers the application of the automatic control theory principles for adaptive designs and the disturbance-stimulated control principle in particular. Relying on the pilot design analysis we construct an informational and mathematical model or a system with reference to which we can create an artifact (an artificial material complex along with the signs of its action) by means of changing the perturbation and control actions. The mechanism changing the perturbation actions vector in the artifact can be treated as an actuator analyzing the design state during its exploitation and able to change the critical or off-design state of the artifact using external effects. The article offers two types of actuators for the systems of framed and girder types. We introduce an actuators design based on the nearly instantaneously changed systems containing quasimechanisms in the form of load-bearing structures and implementing the disturbance-stimulated control principle. The development of the universal actuator of the girder type based on the metal-composite sandwich slab with the elements of nearly instantaneously changed system is discussed.*

**Keywords:** quasimechanism, adaptive design, controlled joining beam, nearly instantaneously changed system, actuator, stress-strain state

### REFERENCES

- [1] Wadhawan V.K. *Smart structures: blurring the distinction between the living and the nonliving*. Oxford, Oxford University Press Publ., 2007, 368 p.
- [2] Chopra I., Sirohi J. *Smart Structures Theory*. United Kingdom, Cambridge University Press Publ., 2013, 920 p.
- [3] Abovskiy N.P. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo — News of higher educational institutions. Construction*, 1994, no. 11, pp. 4–19.
- [4] Irschik H., Nader M. Actuator placement in static bending of smart beams utilizing Mohr's analogy. *Engineering Structures*, 2009, vol. 31 (8), pp. 1698–1706.
- [5] Volkov A.A. *Vestnik MGSU — Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2009, no. 2, pp. 194–198.
- [6] Inoue F. Development of adaptive construction structure by variable geometry truss. *Proceedings of International Symposium Shell and Spatial Structures. Architectural Engineering — Towards the Future Looking to the Past*. Venice, Italy, vol. 3–6, September 2007, pp. 253–272.
- [7] Saeed N.M. *Prestress and Deformation Control in Flexible Structures*. PhD Thesis, Cardiff University Publ., 2014, 292 p.
- [8] Varadan V.K., Vinoy K.J., Gopalakrishnan S. *Smart Material Systems and MEMS: Design and Development Methodologies*. Chichester, England, Hoboken, NY, John Wiley&Sons Publ., 2006, 418 p.
- [9] Kovyryagin M.A. *Regulirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i dinamicheskogo povedeniya elementov konstruksiy* [Regulating the strain-stress state and dynamic behaviour of constructional elements]. Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov Publ., 2006, 138 p.
- [10] Astakhov M.V. *Upravlenie proektirovaniem* [Design management]. Moscow, BMSTU Publ., 2011, 360 p.

- [11] Astakhov M.V., Dikarev V.V. *Podemnyaya platforma samosvalnogo transportnogo sredstva* [The lift platform of the tripping car]. Invention Certificate, no. 1475843 USSR, MKI V60 R1/28, V62D21/00 (USSR), no. 4270894/30-11, 1989, no. 16, 3 p.
- [12] Astakhov M.V., Tyurin E.A. *Traktory i selkhoz mashiny — Tractors and agricultural machinery*, 2007, no. 6, pp. 32–33.
- [13] Sorokina I.I., Astakhov M.V. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/308514.html> (accessed October 30, 2016).
- [14] Tyurin E.A. *Tekhnologiya snizheniya materialoemkosti selskokhozyaystvennykh mashin s pomoshchyu sistem upravlyaemykh zatyazhek*. Diss. kand. tekhn. nauk [The technological process of reducing the materials-output ratio of agricultural machinery by means of the controlled joining beams system. Cand. Eng. Sc. diss.]. Kaluga, 2007, 200 p.

**Astakhov M.V.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Theoretical Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch. e-mail: [mvastahov@gmail.com](mailto:mvastahov@gmail.com)

**Gracheva E.V.**, Assistant, Department of Theoretical Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch. e-mail: [gracheva.e@rambler.ru](mailto:gracheva.e@rambler.ru)