

УДК 004.896: 69.04

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТАХ

ПУТИНЦЕВА А.В.^{1*}, бакалавр

^{1*} Кафедра информационных систем в строительстве, Ростовский государственный строительный университет, ул. Журавлева, д. 33, корпус 8, 344022, г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: anputi@yandex.ru

Аннотация. Цель. Более полвека существует эволюционный механизм оптимизации, более 20 лет многие САЕ-системы существуют и развиваются. Годы наработывался опыт оптимизировать те или иные элементы с помощью генетического алгоритма. Крупнейшие компании разрабатывали платформы для упрощения расчетов инженеру. Конечно, за пару лет не достичь всех этих результатов, но использовать уже существующие механизмы и создавать на их основе более качественные программные продукты, не это ли главное в нашей области. В связи с этим цель данной статьи: исследовать возможные механизмы оптимизации у сторонних систем, и применения этих механизмов в разрабатываемом программном продукте. Также перед автором возникает ряд и других задач, таких как объединение механизмов нескольких программных компонентов и использование полученных результатов для предоставления отчета по всем связанным системам. **Методика.** Основное содержание исследования заключается в изучении возможностей системы ANSYS и ее платформ, возможность интеграции со сторонними приложениями и двунаправленная передача параметров. Автор приводит одно из рассмотренных решений поставленной задачи. В статье описывается пошаговое выполнение реализации в системе ANSYS оптимизации элемента конструкции. Также описана возможная передача параметров, как из разрабатываемого программного продукта, так и с платформы ANSYS Workbench. Разработанная модель интеграции двух систем реализована в программном продукте «Подбор сечений». **Результаты.** Была проведена оптимизация элемента конструкции в системе ANSYS. Полученные данные идут для сравнения результатов оптимизации разрабатываемого продукта. Что поспособствует дальнейшему улучшению системы в целом. Разработанная модель интеграции двух систем показали эффективность данной связки. Данные обновляются в обеих системах, без каких либо длительных процессов. Само построение геометрической модели занимает много времени, но в дальнейшем все графические построения будут производиться автоматически. **Научная новизна.** Добавление в программный продукт уже реализованные механизмы увеличивает значимость этого продукта. Автор считает, реализация несколькими системами генетического алгоритма даст более подробную картину по оптимизированному элементу. Не изучая что-то новое, и не добавляя в разрабатываемое приложение новых возможностей, этот продукт перестанет соответствовать требованиям по решению рода задач, которые на данный момент с легкостью решаются. И тем самым в приложении не будет необходимости. **Практическая значимость.** В статье описываются построение модели для оптимизации элемента конструкции из стороннего приложения в системе ANSYS. Рассмотренная интеграция систем поможет в дальнейшем реализовать связку с другими программными продуктами, и тем самым улучшая разрабатываемую программу и изучая все новые и новые возможности для оптимизации с помощью генетического алгоритма.

Ключевые слова: генетический алгоритм; ANSYS Workbench; оптимизация в системе ANSYS; интеграция систем; обмен переменными между системами

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ В ІСНУЮЧИХ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТАХ

ПУТИНЦЕВА А.В.^{1*}, бакалавр

^{1*} Кафедра інформаційних систем в будівництві, Ростовський державний будівельний університет, вул. Журавльова, д. 33, корпус 8, 344022, г. Ростов-на-Дону, Росія, e-mail: anputi@yandex.ru

Анотація. Мета. Більш півстоліття існує еволюційний механізм оптимізації, більше 20 років багато САЕ-системи існують і розвиваються. Роками напрацьовувався досвід оптимізувати ті чи інші елементи за допомогою генетичного алгоритму. Найбільші компанії розробляли платформи для спрощення розрахунків інженеру. Звичайно, за пару років не досягти всіх цих результатів, але використовувати вже існуючі механізми і створювати на їх основі більш якісні програмні продукти, чи не це головне в нашій області. У зв'язку з цим мета даної статті: дослідити можливі механізми оптимізації у сторонніх систем, і застосування цих механізмів в розробляється програмному продукті. Також перед автором виникає ряд і інших завдань, таких як об'єднання механізмів декількох програмних компонентів і використання отриманих результатів для надання звіту за всіма зв'язаних систем. **Методика.** Основний зміст дослідження полягає у вивченні можливостей системи ANSYS і її платформ, можливість інтеграції зі сторонніми додатками і двунаправлена передача параметрів. Автор наводить одне з розглянутих рішень поставленого завдання. У статті описується послідовне виконання реалізації в

системі ANSYS оптимізації елемента конструкції. Також описана можлива передача параметрів, як з розроблюваного програмного продукту, так і з платформи ANSYS Workbench. Розроблена модель інтеграції двох систем реалізована в програмному продукті «Підбір перерізів». **Результати.** Була проведена оптимізація елемента конструкції в системі ANSYS. Отримані дані йдуть для порівняння результатів оптимізації розроблюваного продукту. Що посприє подальшому поліпшенню системи в цілому. Розроблена модель інтеграції двох систем показали ефективність цієї зв'язки. Дані оновлюються в обох системах, без будь-яких тривалих процесів. Сама побудова геометричної моделі займає багато часу, але в подальшому все графічні побудови будуть проводитися автоматично. **Наукова новизна.** Додавання в програмний продукт вже реалізовані механізми збільшує значимість цього продукту. Автор вважає, реалізація декількома системами генетичного алгоритму дасть більш детальну картину по оптимізованому елементу. Чи не вивчаючи щось нове, і не додаючи в розробляється нових можливостей, цей продукт перестане відповідати вимогою за рішенням роду завдань, які на даний момент з легкістю вирішуються. І тим самим в додатку не буде необхідності. **Практична значимість.** У статті описуються побудова моделі для оптимізації елемента конструкції з стороннього додатка в системі ANSYS. Розглянута інтеграція систем допоможе в подальшому реалізувати зв'язку з іншими програмними продуктами, і тим самим покращуючи розроблювану програму і вивчаючи всі нові і нові можливості для оптимізації за допомогою генетичного алгоритму.

Ключові слова: еволюційний метод; пошук глобального рішення; генетичний алгоритм; залізобетонна балка; оптимізація перетинів

OPTIMIZATION OF STRUCTURAL ELEMENTS BY MEANS OF GENETIC ALGORITHMS IN EXISTING SOFTWARE PRODUCTS

PUTINTSEVA A.V.^{1*}, *bachelor*

¹ Department of information systems in construction, Rostov State University of Civil Engineering, 33/8, str. Zhuravleva, 344022, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: anputi@yandex.ru

Abstract. Purpose. More than half a century, there is an evolutionary mechanism optimization, more than 20 years, many CAE-systems exist and develop. Over the years, accumulating experience to optimize certain elements using genetic algorithm. Major companies have developed platform to simplify calculations engineer. Of course, a couple of years did not achieve all of these results, but use existing mechanisms and to create on their basis of better software, not this thing in our area. In this regard, the purpose of this article: To investigate the possible mechanisms of optimization from third-party systems, and the use of these mechanisms in the developed software product. Also, before the author raises a number of other tasks, such as combining the mechanisms of several software components and use the results to provide a report on all related. **Methodology.** The main contents of the study are to examine the possibilities of ANSYS system and platform, the ability to integrate with third-party applications and bidirectional transmission parameters. The author cites one of the considered task solutions. This article describes how to step through the implementation of the system of ANSYS optimization design element. the possible transfer options are also described as of the developed software product, and with ANSYS Workbench platform. The developed model of integration between the two systems is implemented in software product "Selection of cross-sections". **Findings.** Element for design optimization in ANSYS system was carried out. The findings are to compare the results of optimization of the developed product. That will contribute to further improvement of the overall system. The developed model of integration between the two systems has shown the efficiency of the ligaments. The data is updated in both systems, without any long-term processes. The very construction of the geometric model takes a long time, but in the future all graphical representations will be made automatically. **Originality.** Adding software already implemented mechanisms to increase the value of this product. The author considers the implementation of several systems genetic algorithm will give a more detailed picture of the optimized element. Not learning something new, and adding new capabilities developed by the application, this product will no longer meet the requirement to address kind of tasks that are currently easily solved. And thereby the application will not be necessary. **Practical value.** The article describes the construction of a model to optimize the design element of the third-party application to ANSYS system. The considered systems integration will help in the future to implement a bunch of other software products, and thereby improving the design programs and learning more and more opportunities for optimization using a genetic algorithm.

Keywords: genetic algorithm; ANSYS Workbench; optimization in ANSYS system; systems integration; variable exchange between systems

Введение

Генетический алгоритм - это разновидность эволюционных вычислений, являющийся перспективным направлением в области оптимизации и моделирования. Популярность генетического алгоритма заключается в его способности манипулировать одновременно многими

параметрами и легко адаптироваться под нужную среду разработки. Первые пробы эволюции происходили более полвека назад. Неудивительно, что на сегодняшний день многие системы инженерного анализа (CAE – системы) включают в свои методы расчетов генетический алгоритм. За время существования генетического алгоритма были

разработаны модули или методы для программных продуктов, таких как:

- ANSYS,
- MathCad,
- MatLab,
- Easy NP.

В статье [9] было рассмотрено создание программного продукта на основе генетического алгоритма. Задача заключалась в том, чтобы оптимизировать железобетонную балку по одному критерию и одному ограничению. Для доработки созданного решения была поставлена задача на реализацию передачи данных, заданных для расчета в программном продукте «Подбор сечений», в систему ANSYS, а так же предоставление расчетов ANSYS по заданным характеристикам элемента. Данное решение предоставляет возможность изучить взаимодействие ANSYS со сторонними программными продуктами использование генетического алгоритма в этой системе.

Программный комплекс ANSYS обладает широкими возможностями, которые могут быть использованы для решения подобного рода задач. Для студентов компания ANSYS Inc. предоставляет бесплатную лицензию для обучения. В статье для реализации поставленной задачи используется платформа ANSYS Workbench версии 17.0.

Актуальность данной работы заключается в том, что применение генетического алгоритма в разработанной программе «Подбор сечений» еще недостаточно изучено и эту информационную систему можно улучшить с помощью взаимодействия со сторонними программными продуктами.

Анализ существующих решений

В мире уже существуют программные комплексы и дополнения, разработанные по оптимизационным методам.

Система ANSYS обладает широкими возможностями, которые могут быть использованы сторонними программными продуктами для оптимизационных задач. Подробно система ANSYS рассмотрена в работах [1-5].

Программные продукты, работающие на платформе ANSYS Workbench, относятся к новому поколению средств инженерного анализа. Отличительными особенностями модулей, работающих на этой программной платформе, являются:

- графический интерфейс;
- двунаправленная ассоциативная связь с геометрическими моделями в CAD-системах;
- общее информационное пространство управления проектом инженерного анализа;
- возможность интеграции с СУБД;
- возможность передачи КЭ-модели в стандартную среду ANSYS для дальнейшего расчета.

Этих особенностей хватает для связки стороннего программного продукта и системы ANSYS.

С помощью модели ANSYS Workbench SDK пользователь получает доступ к средствам создания специализированных шаблонов для типовых задач своего предприятия и может интегрировать свои расчетные приложения в рабочую среду Workbench.

Оптимизировать в программе ANSYS можно фактически любой объект проекта. Такие как: форма элемента, значения напряжений, собственные частоты и температуры, потенциалы магнитного поля и другие дискретные величины. Для решения задачи потребуются только оптимизация геометрических параметров.

Инструменты оптимизации включают следующие программные средства:

- факторный анализ;
- градиентный метод;
- генетический алгоритм;
- дискретный метод.

Переменные проекта представляют собой те входные параметры проекта, значения которых предполагается менять. Параметры, которые будут участвовать в оптимизации: длина и ширина балки. Параметры для построения геометрической модели можно задавать из внешнего программного продукта.

Переменные состояния - это характеристики отклика модели, которые используются для оценки проекта на основе установленных пользователем критериев. Эти данные передаются в систему ANSYS от стороннего программного продукта по заданным пользователем геометрическим параметрам и рассчитанным усилиям в конструкции.

Целевая функция - единственная переменная, характеризующая проект в целом; представляет собой функцию, минимум которой требуется найти. Целевой функцией в рассматриваемой задаче является минимально-возможная прочность конструкции.

Если задача содержит большое количество входных параметров или несколько целевых функций, то для таких целей есть пакет optiSLang, который дополняет систему ANSYS.

DYNARDO optiSLang – программное решение для оценки чувствительности, многокритериальной оптимизации, анализа эксплуатационной надежности и отказоустойчивости. Программа работает на платформе Workbench. Также имеется возможность работы совместно с другими программными продуктами ANSYS, и прочими расчетными программами. К ним относятся:

- Оптимизации в optiSLang;
- Градиентные алгоритмы оптимизации (NLPQLP, L-BFGS);
- Генетические алгоритмы, эволюционные стратегии;
- Оптимизация по Парето;
- Методы аппроксимации поверхности отклика (линейные, квадратичные, наименьших квадратов);

- Адаптивные методы аппроксимации поверхности отклика (ARSM);

- Многокритериальный генетический алгоритм;
- Многокритериальные методы Парето и другие.

В поставленной задаче не так много входных параметров и одна целевая функция, поэтому рассмотрение оптимизации с помощью пакета optiSLang не представляет особого интереса.

Еще одна немаловажная модель, которая потребуется для решения поставленной задачи, это модель External Connection. Она не проводит оптимизацию, не строит геометрические модели, но хорошо справляется с передачей параметров между сторонним приложением и средой ANSYS Workbench.

Возможности External Connection:

- создание пользовательских элементов интерфейса и скриптов,
- создание новых систем для облегчения интеграции стороннего приложения.

Практика использования

Цель данной работы заключается в том, чтобы не только оптимизировать элемент конструкции в ANSYS, но и рассмотреть возможности данной системы и связать два программных продукта: ANSYS и «Подбор сечений».

Выполнение поставленной задачи начнем с доработки стороннего приложения, которое будет производить обмен данными со средой ANSYS Workbench.

Для тестирования и изучения интеграции со сторонним приложением среды ANSYS Workbench была разработана небольшая команда ConsExternal, которая отдает и получает параметры для дальнейших расчетов.

Использование External Connection для интеграции собственного приложения требует создания конфигурационного файла компонента. В документации [2] подробно описана структура и элементы нужного файла.

```
<Configuration CellName="Squares" SystemName="SquareSystem"
Version="" ShowEditConfiguration="True">
<Instructions WorkingDirectory="D:/External_files">
<Instruction Type="Init">
<Name></Name>
<Args></Args>
<ParameterParsingRules>
<Parameter Name="SquareInput" Type="Input">
<Rule Type="File">input.txt</Rule>
<Rule Type="StartLine">1</Rule>
<Rule Type="PreString">input</Rule>
<Rule Type="DataType">Double</Rule>
</Parameter>
<Parameter Name="SquareOutput" Type="Output">
<Rule Type="File">output.txt</Rule>
<Rule Type="StartLine">1</Rule>
<Rule Type="PreString">output</Rule>
<Rule Type="DataType">Double</Rule>
</Parameter>
</ParameterParsingRules>
</Instruction>
<Instruction Type="Update">
<Name></Name>
<ExePath>D:/External_files/Squares.exe</ExePath>
<Args></Args>
</Instruction>
</Instructions>
</Configuration>
```

Рис. 1 Пример структуры конфигурационного файла / An example configuration file structure

Конфигурационный файл должен быть написан на языке XML, что позволяет с легкостью визуально читать и программно создавать его. Примерный состав требуемой конфигурации:

- Название элементов системы,
- Рабочая директория,
- Входные и выходные параметры, которые описываются в соответствующих файлах,
- Имя исполняемого файла или скрипта,
- Имя лог-файла, в котором будут писаться сообщения об ошибках.

Для первоначальной оптимизации создадим геометрическую модель, в которую будут вноситься параметры, заданные пользователем в программном продукте «Подбор сечения».

Один из способов задания геометрической модели в ANSYS Workbench - это создание ее с помощью DesignModeler. Продукт DesignModeler – это универсальный CAD-редактор с широким набором инструментов для создания геометрии элементов. ANSYS DesignModeler позволяет создавать, параметризовать геометрию на основе двухмерных эскизов или встроенных примитивов. Так же для задания геометрической модели можно использовать уже построенную модель, которую импортируют в элемент геометрии.

Следующим шагом будет выбор физико-технических параметров (Engineering Data) для построенной геометрической модели. Из материалов в геометрической модели присутствует только бетон для всего элемента.

После проделанной работы по созданию начальных параметров можно связать получившиеся результаты в статическую модель Static Structural.

Установка разбиения модели, усилий, нагрузок и типа закрепления производится в компоненте ANSYS Mechanical.

Продукт ANSYS Mechanical предоставляет широкие возможности для выполнения проектных разработок, анализа и оптимизации. Этот программный компонент является мощным инструментом для определения перемещений, напряжений, усилий, температур, давлений и других важных параметров.

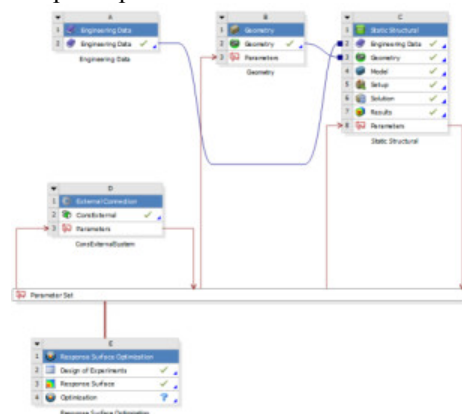


Рис. 2 Полученная модель в ANSYS Workbench / The resulting model in ANSYS Workbench

После построения и задания всех параметров необходимо указать переменные, которые будут нужны для оптимизации.

Заключительным шагом является настройка генетического алгоритма в элементе ANSYS Response Surface Optimization.

Модель, показанная на рисунке 2, получилась небольшой. В нее входит все необходимое для построения и оптимизации элемента конструкции.

После запуска оптимизации, выводятся на экран полученные результаты.

	A	B	C
1		Enabled	Monitoring
2	Optimization		
3	Objectives and Constraints		
4	Minimize P16		
5	Domain		
6	Geometry (B1)		
7	P21 - b	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	P22 - h	<input checked="" type="checkbox"/>	

Рис. 3 Данные оптимизации / Data optimization

На рисунке 3 видно, как от поколения к поколению велась оптимизация геометрических параметров. Разброс получаемых хромосом уменьшался и уменьшался. Это продолжалось до тех пор, пока не найдены были глобальные экстремумы.

На рисунке 4 показаны три наилучших кандидата оптимизации элемента конструкции.

Candidate	Best	2nd Best	3rd Best
P21 - b	302.89	276.22	355.4
P22 - h	128.84	494.05	524.42
F22 - Reaction Pressure (Max)	11.865	11.868	11.868

Рис. 4 Наилучшие кандидаты / The best candidates

Выводы

Существующие CAE – системы значительно упрощают работу инженера и дают возможность анализировать полученные результаты. Исходя из этого, можно сказать, что реализация связи с программным комплексом ANSYS значительно улучшит реализованную систему. Так же важно, чтобы программный продукт был доступным для использования в расчетах элементов конструкции. На основе этих принципов улучшается информационная система «Подбор сечений».

Изучение программного комплекса ANSYS и его методов оптимизации предоставляет возможность в дальнейшем улучшать информационную систему «Подбор сечений». В ходе изучения возможностей ANSYS была создана интеграционная связь между двумя приложениями и произведена оптимизация в среде ANSYS Workbench по полученным геометрическим и физическим данным информационной системы «Подбор сечений».

При дальнейшем усовершенствовании система сможет решать многокритериальные задачи, включающие множество параметров оптимизации. В дальнейшем изменения информационной системы позволят пользователю выполнять оптимизацию в программе ANSYS, не вникая в тонкости построения геометрической и физической модели. Кроме этого, пользователь сможет проанализировать данные, полученные с помощью генетического алгоритма и методами, разработанными в программном комплексе ANSYS.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Барулина М.А. Использование ANSYS WORKBENCH для работы с геометрическими моделями / М.А. Барулина. – Москва: Эдитус, 2012. – 316 с.
2. Басов К. А. ANSYS для конструкторов / К.А. Басов. Москва: ДМК Пресс, 2009. – 248 с.
3. Бруйка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. часть 1 / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
4. Бруйка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. часть 2 / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Я.В. Кураева. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.
5. Гладков Л. А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.М. Курейчик, В.В. Курейчик. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.
6. Единый центр поддержки продуктов ANSYS в России и странах СНГ. – Режим доступа: <http://cae-expert.ru/>. – Загл. с экрана. – Проверено: 01.10.2016.
7. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования / А.В. Жидков. – Нижний Новгород: ННГУ, 2006. – 115 с.
8. Клуб пользователей ANSYS. – Режим доступа: <http://cae-club.ru/>. – Загл. с экрана. – Проверено: 17.09.2016.
- Путинцева А.В. Оптимизация сечения железобетонной балки с использованием генетического алгоритма / А.В. Путинцева // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепрпетровск, 2015. – Вып. 86: Информационные технологии в образовании, науке и управлении // Сборник научных трудов. – С. 94-99.
9. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – Москва: Горячая линия -Телеком, 2008.

10. ANSYS, Лицензирование, внедрение, консалтинг – CADFEM – Режим доступа: <http://www.cadfem-cis.ru/> .- Загл. с экрана.- Проверено: 17.09.2016.
11. Ferreira C. Function finding and the creation of numerical constants in gene expression programming In / C. Ferreira, Benitez J. M., Cordon O., Hoffmann F., Roy R., *Advances in Soft Computing: Engineering Design and Manufacturing*, Springer-Verlag, 2003. – с.
12. Ferreira C. Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems / Ferreira C. // *Complex Systems*, № 13 (2): 2001.
13. Ferreira, C., Genetic representation and genetic neutrality in gene expression programming / C. Ferreira // *Advances in Complex Systems*, №.5 (4): 2002.

REFERENCES

1. Barulina M.A. *Ispolzovanie ANSYS WORKBENCH dlya raboty s geometricheskimi modelyami* [Using ANSYS WORKBENCH to work with geometric patterns] Moscow: Editus Publ., 2012, 316 p. (in Russian)
2. Basov K.A. *ANSYS dlya konstruktorov* [ANSYS for designers], Moscow: DMK Press Publ., 2009, 248 p. (in Russian)
3. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeyanov I.E. *Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench: chast 1* [Engineering analysis in ANSYS Workbench: Proc. allowance. part 1]. Samara, Samar gos. tekhn. un-t, 2010, 217 p. (in Russian)
4. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Kuraeva Ya.V. *Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench: chast 2* [Engineering analysis in ANSYS Workbench: Proc. allowance. part 2]. Samara, Samar gos. tekhn. un-t, 2013. 149 p. (in Russian)
5. Gladkov L.A., Kureychik V.M., Kureychik V.V. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic algorithms]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2006, 320 p. (in Russian)
6. *United Center Support ANSYS products in Russia and CIS countries*. - Available at: <http://cae-expert.ru> (in Russian)
7. Zhidkov A.V. *Primenenie sistemy ANSYS k resheniyu zadach geometricheskogo i konechno-elementnogo modelirovaniya* [Application of ANSYS system to meet the challenges of the geometric and finite element modeling]. Nizhniy Novgorod, NNGU Publ., 2006, 115 p. (in Russian)
8. *ANSYS User Club*. - Available at: <http://cae-club.ru/> (the date of circulation: 17.09.2016). (in Russian)
9. Putintseva A.V. *Optimizatsiya secheniya zhelezobetonnoy balki s ispolzovaniem geneticheskogo algoritma* [Optimization section reinforced concrete beams using a genetic algorithm] *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* – [Construction, materials science, mechanical engineering]. PDABA. Dnipropetrovsk, 2015, no. 86, pp. 94-99. (in Russian)
10. Rutkovskaya D., Pilinskiy M. AND Rutkowskiy L. *Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems*. - Moscow: Hotline Telecom 2008. (in Russian)
11. ANSYS, licensing, implementation, consulting - CADFEM. - Available at: <http://www.cadfem-cis.ru/> (the date of circulation: 15.09.2016). (in Russian)
12. Ferreira C., Benitez J. M., Cordon O., Hoffmann F. and Roy R. *Function finding and the creation of numerical constants in gene expression programming*. *Advances in Soft Computing: Engineering Design and Manufacturing*, Springer-Verlag, 2003
13. Ferreira C., *Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems*. *Complex Systems*, no.13 (2): 2001.
14. Ferreira C., *Genetic representation and genetic neutrality in gene expression programming*, *Advances in Complex Systems*, no. 5 (4): 2002.