

УДК 539.3: 621.9: 004.94

Н.А. ТКАЧУК, В.Ф. КЛИМОВ, А.В. ХЛАНЬ, А.И. ШЕЙКО, А.Н. МАЛАКЕЙ, В.И. КОХАНОВСКИЙ, А.В. ГРАБОВСКИЙ, А.Ю. ТАНЧЕНКО, А.Ю. ВАСИЛЬЕВ, М.А. БОНДАРЕНКО, А.А. ЗАРУБИНА, А.В. НАБОКОВ

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЪЕКТОВ БРОНЕТАНКОВОЙ ТЕХНИКИ

При проектних дослідженнях об'єктів бронетанкової техніки широко застосовується комп'ютерне моделювання. У силу складності необхідно нарощувати потужності та розширювати можливості програмно-апаратних засобів, які до цього залучаються. У роботі описано структуру й функціонування спеціалізованого програмно-апаратного комплексу для комп'ютерного моделювання на цій основі проектних рішень елементів та об'єктів бронетанкової техніки.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, програмно-апаратний комплекс, об'єкт бронетанкової техніки

При проектних исследованиях объектов бронетанковой техники широко применяется компьютерное моделирование. В силу сложности необходимо наращивать мощности и расширять возможности программно-аппаратных средств, которые до этого привлекаются. В работе описана структура и функционирование специализированного программно-аппаратного комплекса для компьютерного моделирования на этой основе проектных решений элементов и объектов бронетанковой техники.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, программно-аппаратный комплекс, объект бронетанковой техники

Computer modeling is widely used in design researches of armored technics objects (ATO). Due to complexity, it is necessary to increase the capacity and expand the capabilities of software and hardware, which are involved. On this basis the paper describes the structure and functioning of the specialized software and hardware complex (SSHC) for computer modeling of design solutions for elements and objects of armored technics. The conducted complex of calculated and experimental researches has confirmed reliability and accuracy of single modules of the software and hardware complex. The developed SSHC makes it possible to construct spatial parametric models and finite-element networks of ATO elements in an automated mode

Keywords: computer modeling, software and hardware complex, armored technics object

Введение

С целью обоснования технических решений объектов бронетанковой техники (ОБТ) на этапе проектных разработок широко используются универсальные CAD/CAM/CAE-системы. Однако, в силу специфики проектируемых изделий, в настоящее время или отсутствуют, или находятся вне легального доступа специальные программно-аппаратные средства, которые нацелены на решение всего комплекса задач для объектов бронетанковой техники. Поскольку разработка таких средств "с нуля" достаточно затратна по времени и ресурсам, то в работах [1–3] предложен подход, предполагающий создание специализированного программно-аппаратного комплекса (СПАК). Они опираются на соединение широких возможностей универсальных CAD/CAM/CAE-систем, с одной стороны, и на создание специализированных программных модулей, а также параметрических моделей ОБТ, – с другой.

Целью данной работы является реализация предложенного подхода в виде СПАК, а также его тестирование на примерах решения ряда задач.

Структура и схема функционирования программно-аппаратного комплекса

Предложенная в работе технология исследований реализована в виде специализированного программно-аппаратного комплекса (рис. 1). Используя единый формат данных, носители информации и единую технологию работы с информацией, на основе обобщенного параметрического подхода [1–3] строится работа с моделями и массивами данных, представленная на рис. 2.

Рассмотрим функционирование отдельных звеньев созданного СПАК. Для обеспечения параллельного проведения исследований на всех этапах

работ (параллельно с разработкой моделей, чертежей, оснастки и т.д.) необходимы или использование единой информационной базы для всех этапов работ, или разработка специальных процедур согласования структур данных на различных этапах. Это может быть осуществлено как в ручном режиме, так и путем создания специализированных систем автоматизированного проектирования, исследования и изготовления.



Рисунок 1 – Общая схема анализа и синтеза элементов ОБТ

Специализированные системы ориентированы на те или иные классы объектов. Для обмена информацией между этими системами и универсальными системами могут быть разработаны специальные форматы и программное обеспечение. В то же время некоторые системы (например, Pro/ENGINEER (Creo)), обеспечивают единый формат хранения и обработки данных. Основой их функционирования является параметрический подход к пространственным, расчетным моделям и конструкторским документам. Естественным образом предлагается использовать параметрический подход, в частности, к построению и исследованию моделей даже без обеспечения сквозной цепочки ассоциативных связей в течение выполнения проекта создания той

© Ткачук Н.А., Климов В.Ф., Хлань А.В., Шейко А.И., Малакей А.Н., Кохановский В.И., Грабовский А.В., Танченко А.Ю., Васильев А.Ю., Бондаренко М.А., Зарубина А.А., Набоков А.В., 2017

или иной сложной механической системы (рис. 3). В параметрической модели определяющими параметрами могут быть как конструктивные размеры, так и силовые воздействия, технологические параметры, физико-механические свойства материалов и т.д., а также варианты конструктивных решений. Важно то, что при параметризации моделей исследуемых элементов соблюдается целостность конструкции при варьировании отдельных их параметров или наборов таких параметров. Параметризация также является основным шагом на пути применения того или иного метода оптимизации конструкции. В данном случае предлагается параметрический подход предложить для уточнения параметров достоверных численных моделей исследуемых элементов (типы конечных элементов, их размеры, зоны сгущения и т.д.).



Рисунок 2 – Структурная схема системы автоматизированного расчетно-экспериментального исследования

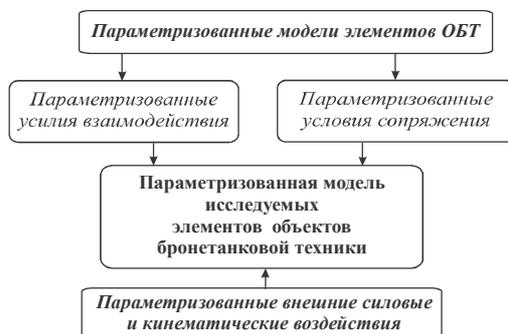


Рисунок 3 – Параметризованные модели элементов сложной механической системы

Существующие в настоящее время направления исследования механических конструкций можно разделить по типу используемого программного обеспечения (специализированное и универсальное), преимущества и недостатки которых обусловлены их структурой, сложностью и областью применения. Для устранения недостатков указанных типов программного обеспечения и объединения их преимуществ предлагается использовать интегрированные схемы исследований. Данные подходы объединяют универсальные САД-системы (например, Creo), универсальные САЕ-системы (ANSYS), а также специальное ПО. Результатом работы всего указанного комплекса являются параметризованные конечно-элементные модели, которые позволяют оперативно проводить построение баз данных и их модификацию для возникающих задач.

Использование специализированных программных модулей позволяет дополнить современ-

ные мощные компьютерные системы проектирования и анализа накопленным опытом, знаниями и учетом специфики проектируемых изделий. При этом объединяются тенденции универсализации, возможностей интеллектуализации моделей и специализации их направленности.

Таким образом, комплексная схема построения конечно-элементной модели элементов сложных механических систем и исследования их напряженно-деформированного состояния (НДС) принимает многозвенный вид, представленный на рис. 4.

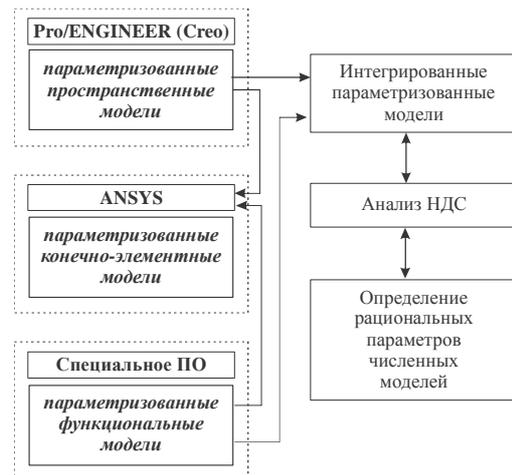


Рисунок 4 – Комплексная схема построения параметрических моделей для исследования НДС элементов объектов бронетанковой техники

Предложенный подход соединяет преимущества параметрического моделирования, универсальности и учета специфики исследуемых конструкций, специализированного программного обеспечения, а также классического метода конечных элементов. Полученные параметрические модели в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, используются для поливариантных расчетов напряженно-деформированного состояния элементов ОБТ с целью определения параметров достоверных численных моделей.

Предложенный подход позволяет устранить существующие недостатки традиционной технологии расчетных и экспериментальных исследований НДС элементов сложных механических систем, а именно формализовать процесс сравнения, автоматизировать процесс улучшения численной модели и повысить оперативность всего цикла исследований на основе применения параметрических пространственных твердотельных и конечно-элементных моделей.

Взаимодействие отдельных модулей СПАК показано на рис. 5. Как указывалось ранее [1–3], самостоятельную ценность имеют не только и не столько экспериментально проверенные результаты численных исследований, но и рационально сбалансированная достоверная численная модель объекта. Конечно-элементная модель сложного объекта может иметь также и большую коммерческую ценность. Кроме того, предложенная методика может быть положена в основу иерархической базы данных и знаний о том или ином классе объектов, причем объектами сравнения могут быть множества баз данных (как численных, так и экспериментальных). Здесь также могут быть введены соответствующие критерии улучшения модели, причем для сравнения могут быть взяты модели, полученные неза-

висимо из различных источников и в разное время. Окончательным результатом исследования является достоверная численная модель для определения НДС тех или иных объектов или классов объектов.



Рисунок 5 – Взаимодействие модулей созданного САПР на базе метода конечных элементов и спекл-голографической интерферометрии

При решении поставленной задачи при помощи предложенного расчетно-экспериментального метода (РЭМ) [1–3] ее можно обратить: пусть имеется достаточно точный инструмент исследования численных моделей, однако существует сомнение в применимости тех или иных математических моделей. То же – на любом участке цепи "математическая модель – численная модель – экспериментальная модель с измерительной аппаратурой". В этом случае можно определить структуру и параметры той или иной модели или определить область в пространстве варьируемых параметров, в пределах которой справедливы созданные модели.

Формально в процессе исследований можно "уравнять в правах" все типы моделей, выделив группу уточняющих моделей и уточняемую модель. Кроме того, возможна и постановка "смешанной" задачи, т.е. задачи, в которой объектом уточнения является множество параметров, представляющее совокупность параметров из различных типов моделей. В этом случае вместо уточняющих и уточняемых моделей (и их параметров) в качестве основных объектов выступают соответственно подмножества параметров. Более того, состав этих множеств может изменяться за счет "миграции" параметров из группы в группу.

Предлагаемый метод изучения НДС элементов бронетанковой техники допускает глубокую степень формализации, однако большую роль в

процессе исследований играет сам исследователь (или группа исследователей). В его компетенции – определение, изменение (удаление, пополнение) множества параметров, а также границ их изменения, разрешение коллизий, а также текущий контроль за процессом. Это обусловлено, во-первых, невозможностью на данном этапе полной формализации предлагаемой технологии исследований, во-вторых, необходимостью исключения тупиковых ситуаций и, в-третьих, очень высокой стоимостью ошибки (неоправданное усложнение плана экспериментальных исследований может повлечь такой рост общей стоимости всего комплекса исследований группы или класса конструкций, что он превысит стоимость аналогичных работ по традиционному способу).

Предложенные схемы расчетно-экспериментальных исследований позволяют оперативно проводить *серии* исследований групп конструкций, причем наиболее трудоемкая часть, а именно экспериментальная, проводится в минимально необходимом объеме.

Используя преимущества Web-технологий, исследования с применением предложенного РЭМ можно, во-первых, распараллелить (т.е. одновременно выполнять отдельные этапы и подэтапы силами различных исследователей и исследовательских групп), а, во-вторых, разнести географически и хронологически. При организации сервера баз данных возможна также определенная организация хранения результатов исследований, позволяющая создавать банки данных по тем или иным группам конструкций. Придав таким базам данных свойства открытости и доступности, на определенной стадии их развития можно создавать "верификационные эталоны" для различных видов механических систем. Это в свою очередь позволяет создавать экспертные системы, само существование которых избавило бы от необходимости проводить большую часть экспериментальных исследований, поскольку перед предстоящим циклом исследований всегда была бы возможность обратиться к соответствующей (и все время пополняемой) базе знаний. Чем полнее и совершеннее эта база, тем больше вероятность получить необходимые рекомендации для построения достоверной численной модели исследуемых объектов бронетанковой техники.

Естественно, что при проведении расчетно-экспериментальных исследований в предложенной постановке одним из требований является некоторая степень *избыточности* экспериментальных данных, которая позволяет повысить степень точности и полноты создаваемой численной модели. Таким образом, предложенный подход позволяет устранить существующие недостатки традиционной технологии расчетных и экспериментальных исследований НДС элементов сложных механических систем, а именно формализовать процесс сравнения, автоматизировать процесс улучшения численной модели и повысить оперативность всего цикла исследований.

Состав программного и аппаратного комплексов

При оснащении создаваемого программно-аппаратного комплекса программным обеспечением учитывались следующие факторы: максимальные функциональные возможности программного обеспечения; беспрепятственность обмена данными; соответствие потребностей программного обеспечения возможностям аппаратного обеспечения; возмож-

ность использования лицензионного программного обеспечения в научных исследованиях и учебном процессе. В связи с этим в состав ПО были включены следующие программные комплексы (рис. 6).

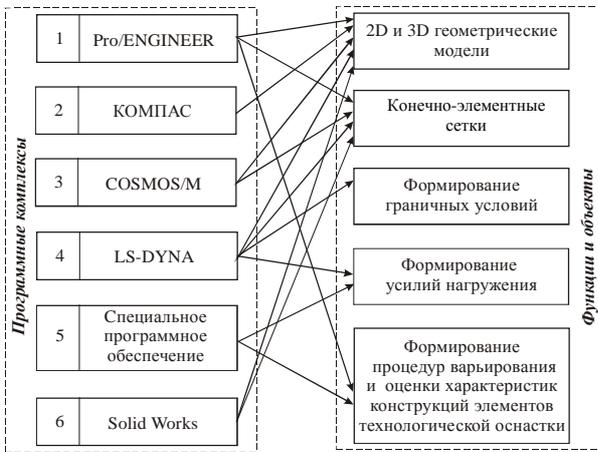


Рисунок 6 – Программные комплексы, их функции и объекты оперирования в создаваемом программно-аппаратном комплексе



Рисунок 7 – Состав и функции элементов аппаратного обеспечения программно-аппаратного комплекса

Для реализации всех возможностей разработанного и привлекаемого программного обеспечения при формировании аппаратного обеспечения

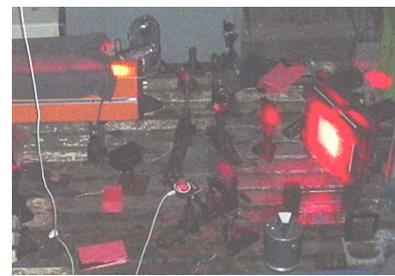
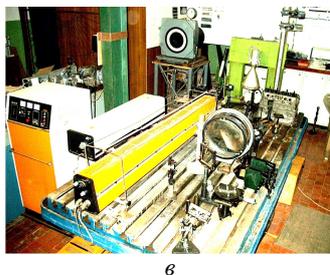
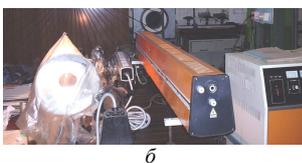


Рисунок 8 – Элементы созданного программно-аппаратного комплекса – спекл-голографическая интерферометрия:

а – элементы оптической схемы, б – лазер гелий-неоновый, в – голографическая установка СИН-1, г – система ввода графической информации в компьютер на базе цифровых камер

созданного программно-аппаратного комплекса предъявлялись следующие требования: максимальное использование возможностей, предоставляемых ПО и операционными системами; сбалансированность отдельных звеньев аппаратного обеспечения и каналов передачи информации; унификация платформ и оборудования отдельных звеньев аппаратного обеспечения; сравнительно низкая стоимость.

Комплексу данных требований отвечает аппаратное обеспечение, приведенное на рис. 7. Созданный СПАК обеспечивает расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем практически любой степени сложности в короткие сроки. Так, характеристики кластера: количество процессорных ядер – 64 (процессор Intel Core Quad); объем оперативной памяти – 128 Гб (дополнительно в 2010 г. установлен мощный 12-ти ядерный решатель на базе процессоров Xeon с ОЗП 48 Гб) позволяют размещать в оперативной памяти задачи, по объему соответствующие граничным возможностям операционной системы Windows и системы ANSYS. При этом RAID-массивы накопителей на жестких магнитных дисках позволяют размещать сверхгромоздкие базы данных и оперативно их обрабатывать. Голографическая установка СИН-1 (рис. 8) дает возможность фиксации спекл-интерферограмм проектируемых элементов технологической оснастки, причем точность определения перемещений – до 0,1 мкм. Для ввода графической информации в компьютер используется комплекс на основе цифровых камер (см. рис. 8). Передача и хранение информации осуществляется при помощи накопителей на жестких магнитных дисках, собранных в массивы RAID.

Разделение задачи численных исследований на препроцессинг, решение систем уравнений и постпроцессинг позволяет эффективно использовать вычислительные ресурсы программно-аппаратного комплекса (ПАК), привлекая на первый и третий этапы этого процесса компьютеры с более скромными требованиями к их техническим характеристикам и сосредотачивая всю вычислительную мощь, требуемую на втором этапе, на кластерной системе и многопроцессорных рабочих станциях.

Особенностью созданного ПАК является блочно-модульная структура аппаратного обеспечения и программного обеспечения, способность к развитию и модернизации, универсальность.

Решение модельных задач

С использованием разработанного программно-

аппаратного комплекса было проведено решение ряда тестовых задач. В частности, для апробации функционирования экспериментальной части ПАК было спроекти-

ровано, изготовлено и смонтировано устройство под условным названием "Краб" (рис. 9). Данное устройство позволяет проводить крепление и нагружение сплошных и перфорированных пластин, геометрия которых может быть достаточно произвольной. В частности, были спроектированы, изготовлены и исследованы сплошные и перфорированные пластины для имитации поведения базовых плит приспособлений и других объектов с особенностями геометрии.

На рис. 10 приведены некоторые голографические интерферограммы, характеризующие деформированное состояние пластин при действии центрально приложенной внешней силы (имитировалось при помощи силового винта приспособления "Краб"). Параллельно с экспериментом проводился численный анализ напряженно-деформированного состояния

данных пластин толщиной 2 и 4 мм, материал – Сталь 20Х, размеры по контуру закрепления – 0,18х0,18 м (рис. 11), конечно-элементные модели тест-пластин приведены на рис. 12.

На рис. 13 приведены результаты количественного сравнения данных, полученных численно и экспериментально. Видно, что при уменьшении среднего размера конечного элемента в конечно-элементных моделях повышается точность результатов. Однако это приводит к значительному росту требуемых для расчетов вычислительных ресурсов. Таким образом, исходя из конкретных условий и требований, возникающих на практике, можно путем варьирования конечно-элементной модели обеспечивать необходимую точность численных моделей элементов ОБТ.

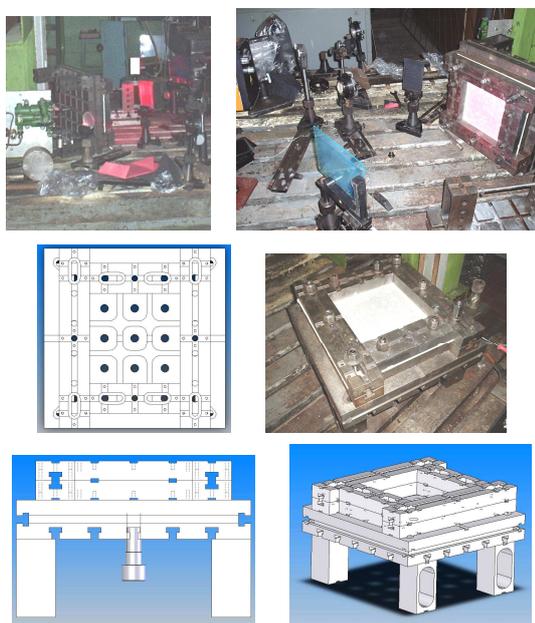


Рисунок 9 – Экспериментальное устройство "Краб"

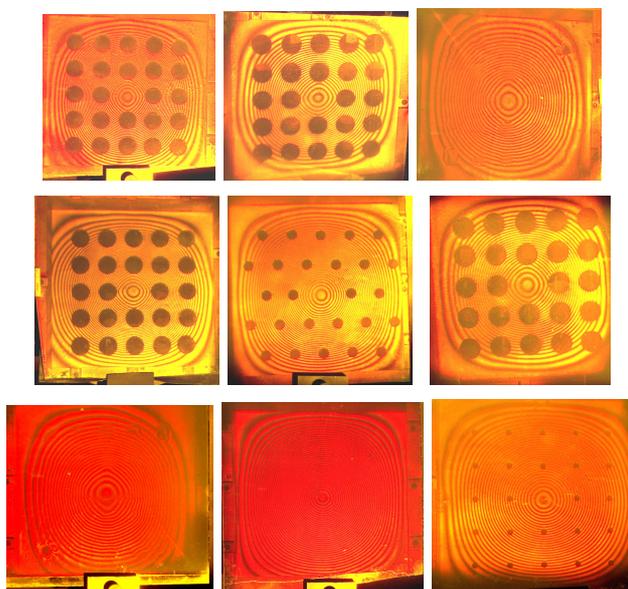


Рисунок 10 – Голографические интерферограммы тест-пластин

Рисунок 11. Схема сплошных и перфорированных тест-пластин с диаметром отверстий:
 а – 0,005 м; б – 0,01 м;
 в – 0,01 м; г – 0,02 м

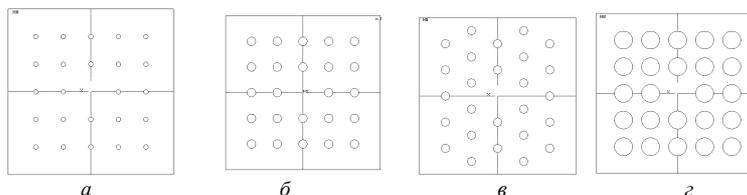
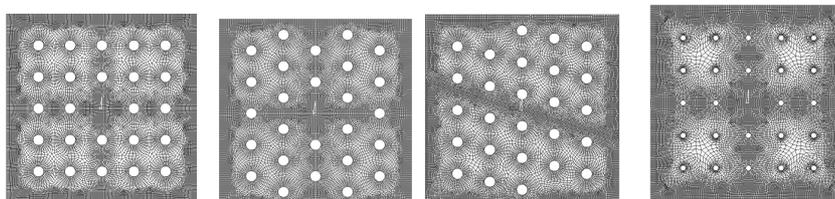


Рисунок 12 – Конечно-элементные модели тест-пластин



Наблюдаемый в ходе расчетно-экспериментальных исследований эффект неустранимой ошибки связан с погрешностями записи и расшифровки спекл-интерферограмм. В связи с этим для определения влияния собственно эффекта сгущения конечно-элементной сетки на точность вычисления компонент НДС был проведен численный эксперимент. Объект исследований: прямоугольная пластина со сторонами

$a \times b$ (рис. 14). Условия закрепления: свободное опирание пластины по краям (шарнирное закрепление). Условия нагружения: распределенное по пластине постоянное давление. Необходимо найти: аналитическое и численное решения с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Контролируемые параметры: деформации; напряжения; полная энергия пластины; погрешности указанных величин; сходимость решения; ресурсы, затрачиваемые компьютером, при вы-

числении НДС с заданной точностью.

Без снижения общности для конкретных вычислений были выбраны следующие параметры: геометрические параметры: $a = b = 1$ м – длина и ширина пластины соответственно; $h = 0,1$ м – толщина пластины; физические параметры: $E = 2.1E+11$ – модуль

Юнга (модуль упругости материала); $\nu = 0,28$ – коэффициент Пуассона; параметры нагружения: $q = 10^4$ Н/м² – величина плотности распределения давления.

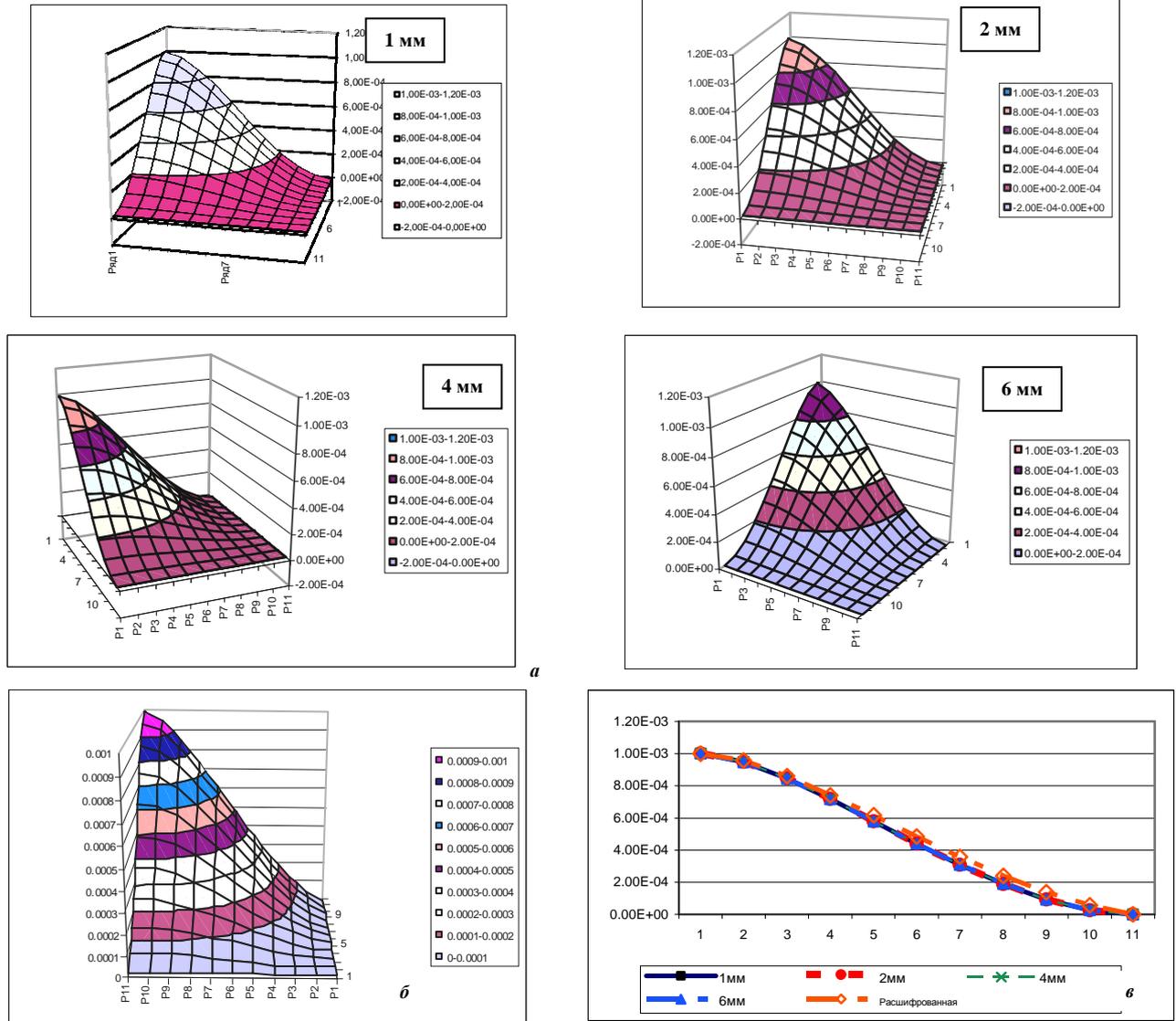


Рисунок 13 – Результаты численного сравнения экспериментальных и численных данных анализа НДС тест-пластин (одна четверть):

- а – распределение перемещений в пластине, полученное на конечно-элементной модели с размером конечного элемента;
 б – распределение перемещений в пластине, полученное при расшифровке картины интерференционных полос;
 в – распределение разности перемещений, полученных численно и экспериментальным путем

Точное решение для пластины получено в виде тригонометрического ряда [4] с его программированием в программном пакете Maple.

При нахождении численного решения с помощью МКЭ было принято решение воспользоваться возможностями, предоставляемыми САЕ пакетами ANSYS и Femar. Кроме того, был проведен проверочный расчет в программе.

Было проведено 55 расчетов с различной сеткой, которая варьировалась в пределах от 11 до 101 элемента на сторону. В качестве элемента был выбран "Shell 4" – 4-х узловой оболочечный элемент с 6-ю степенями свободы в узле, предназначенный для рас-

чета упругого деформирования пластинчатых оболочечных конструкций. Интегральные результаты расчетов для количества узлов от 11x11 до 101x101 представлены в виде относительной погрешности вычислений на рис. 15.

График зависимости точности получаемых результатов от качества разбивки (сравнение разницы энергий) приведен на рис. 16.

Коэффициент пропорциональности получаемой точности ($\ln|\Delta U/U|$) от качества разбивки ($\ln N$, где N – число элементов) равен 0,97576.

График зависимости точности получаемых резуль-

татов от качества разбивки (сравнение разницы перемещений) показан на рис. 17.

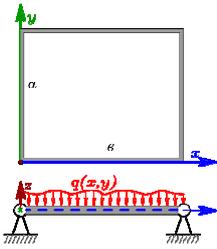


Рисунок 14 – Тест-пластина для численного эксперимента

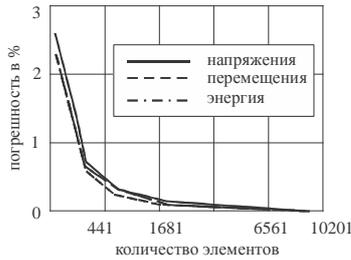


Рисунок 15 – Относительная погрешность вычислений

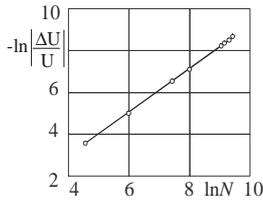


Рисунок 16 – Зависимость погрешности в энергии от количества узлов конечно-элементной модели в логарифмическом масштабе

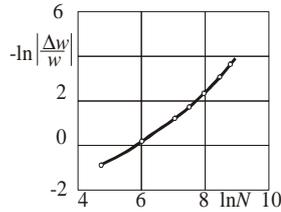


Рисунок 17 – Зависимость погрешности в перемещениях от количества узлов конечно-элементной модели в логарифмическом масштабе

Картинки, приведенные на рис. 16, 17, позволяют для исследуемого элемента определить вклад собственно эффекта количества конечных элементов на все характерные параметры численного определения НДС элементов ОБТ.

Методы, алгоритмы и программные модули для минимизации нелинейного функционала несоответствия результатов экспериментальных и численных исследований. При применении расчетно-экспериментального метода исследования физико-механических процессов в элементах сложных механических систем центральной проблемой является создания достоверной, сбалансированной оптимизированной расчетной конечно-элементной модели данных элементов. Задача приводится к проблеме минимизации функционала несоответствия результатов численных и экспериментальных исследований. Численные методы и алгоритмы минимизации этого функционала могут быть самыми разнообразными. Однако они должны в данном случае отвечать специфике решаемой задачи, а именно:

- минимизируемый функционал может иметь произвольный вид, то есть заведомо нельзя предусмотреть, что он выпуклый, наблюдается ли один экстремум (или несколько, или бесконечное количество), или может быть ситуация типа "овраг";
- область параметрического пространства, в пределах которой происходит поиск минимума функционала, может быть ограниченной или неограниченной, выпуклой или невыпуклой, состоять из нескольких подобластей, в том числе вырожденных;
- чувствительность функционала к изменению

тех или иных параметров может отличаться на несколько порядков.

Таким образом, методы, алгоритмы и программное обеспечение для решения задачи минимизации функционала несоответствия должны быть такими, чтобы позволять определять минимум функционала произвольного вида при произвольных ограничениях. Эта задача является достаточно сложной, единого метода ее решения на сегодняшний день не существует. В то же время в цепи расчетно-экспериментального метода предусмотрено участие исследователя, который для конкретной задачи может сформулировать те или иные дополнения, уточнения, которые могут устранить полную неопределенность, характерную для сформированных выше обстоятельств.

Ниже приведены методы, алгоритмы и программное обеспечение, которые применены для минимизации функционала несоответствия результатов численных и экспериментальных исследований.

Объектом исследований является функционал $J(x_1, x_2)$, где x_1, x_2 – варьируемые параметры. Эти параметры изменяются в области $x_1 \in \Delta x_1, x_2 \in \Delta x_2$, где $\Delta x_1 = [x_{11} \ x_{12}], \Delta x_2 = [x_{21} \ x_{22}]$. Функционал является мерой несоответствия результатов экспериментальных и численных исследований. Чем меньше значение этого функционала, тем точнее описывает математическая модель расчет напряженно-деформированного состояния сложного трехмерного механического объекта. Функционал $\{J_{ij}, x_{1i}, x_{2i}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n\}$ задан в табличном виде на сетке (равномерной или неравномерной) значений x_1, x_2 из области $\{\Delta x_1, \Delta x_2\}$.

Таким образом, задача состоит в нахождении некоторых x_1^*, x_2^* , для которых функционал $J(x_1, x_2)$ достигает глобального минимума на области $\{\Delta x_1, \Delta x_2\}$ с заведомо заданной точностью ϵ .

В общем случае функционал J зависит не только от параметров x_1, x_2 , а также от ряда других параметров. Параметры x_1, x_2 являются основными в поведении функционала. Изложенный ниже метод поиска минимума функционала описан для двух параметров – x_1, x_2 . Однако этот метод возможно без особой сложности распространить на любое количество параметров.

Для изложения метода в терминах алгоритмов вводятся новые обозначения: $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$, $\Delta \mathbf{x} = (\Delta x_1, \Delta x_2)$, $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*)$. Они обеспечивают использование индексов для векторов и их координат. Таким образом, задача состоит в поиске вектора \mathbf{x}^* в ограниченной области $\Delta \mathbf{x}$, для которого функционал $J(\mathbf{x})$ достигает наименьшего значения. В общем случае функционал J является нелинейной функцией x_i . Кроме того, функционал задан лишь на сетке точек области $\Delta \mathbf{x}$, а именно как совокупность чисел $\{J_{ij}, x_{1i}, x_{2i}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n\}$.

Итак, поиск минимума функционала J является задачей нелинейного дискретного программирования с ограничениями. При этом спецификой задачи является возможность (хотя и ограниченная ресурсами в каждом

конкретном случае) изменения шага дискретизации по некоторым параметрам.

Как правило, при решении задач нелинейного программирования градиентные методы и методы, использующие вторые производные, сходятся быстрее, чем методы, которые не вычисляют производных (так называемые методы поиска). Тем не менее, применение на практике методов, которые используют производные, приводит к двум довольно сложным ограничениям. Во-первых, в задачах с дискретно заданной функцией довольно тяжело или даже невозможно получить производные в виде аналитических функций, которые необходимы для градиентного алгоритма или для алгоритма, который использует производные второго порядка. Хотя расчет аналитических производных можно заменить расчетом производных с помощью разностных схем, ошибка, которая возникает при этом, в особенности в окрестности экстремума, может ограничить применение подобной аппроксимации. Во-вторых, в задачах с дискретно заданной функцией довольно тяжело или даже невозможно получить производные в виде аналитических функций, которые необходимы для градиентного алгоритма или для алгоритма, который использует производные второго порядка. Хотя расчет аналитических производных можно заменить расчетом производных с помощью разностных схем, ошибка, которая возникает при этом, в особенности в окрестности экстремума, может ограничить применение подобной аппроксимации. Вторым обстоятельством является то, что при использовании методов оптимизации, которые основаны на расчете первых и в случае потребности – вторых производных, необходимо, в отличие от методов поиска, довольно большое время на подготовку задачи к решению.

Для преодоления изложенных выше сложностей были разработанные алгоритмы оптимизации, которые используют прямой поиск. Несмотря на то, что эти методы в случае простых задач реализуются медленнее, на практике они оказываются более удовлетворительными, чем градиентные методы или методы, которые используют вторые производные. Решение задачи с их помощью может обойтись дешевле, если стоимость подготовки задачи к решению больше по сравнению со стоимостью машинного времени.

По своей сути методы поиска простейшего типа состоят в изменении каждый раз одной переменной, тогда как другие остаются постоянными, пока не будет достигнут минимум. Например, в одном из таких методов переменная x_1 устанавливается постоянной, а x_2 изменяется до тех пор, пока не будет достигнут минимум. После этого переменная x_2 сохраняет свое новое значение как постоянное, а x_1 изменяется, пока не будет достигнут минимума и т.д. Однако такой алгоритм работает плохо, если имеет место взаимозависимость между x_1 и x_2 , то есть если в выражении для целевой функции входят члены, которые содержат произведение x_1, x_2 .

Изложенный метод называют *методом циклического покоординатного спуска*. Сходимость этого метода выходит из предположений: минимум целевой функции в любом направлении области поиска единственен; последовательность точек, которую рассчитывает алгоритм, содержится в компактном множестве области поиска. Стратегия покоординатного спуска гарантированно приводит к минимуму целевой функции. Но скорость этого процесса довольно невысокая.

В особенности медленно работает этот метод для функций, минимум которых находится в области, где функции имеют вид оврага, который тянется вдоль направления $x_1 = x_2$. Для ускорения метода в случаях оврагов предлагается на каждой p -й итерации выполнять поиск вдоль направления $x_1 - x_2$, где p устанавливается экспериментальным путем.

Предложена логически простая стратегия поиска, использующая комбинацию покоординатного спуска с одномерной минимизацией по направленному "поиску по образцу". В интерпретации Вуда [5] этот алгоритм включает два основных этапа: "исследовательский поиск" вокруг базисной точки и "поиск по образцу", то есть в выбранном для минимизации направлении.

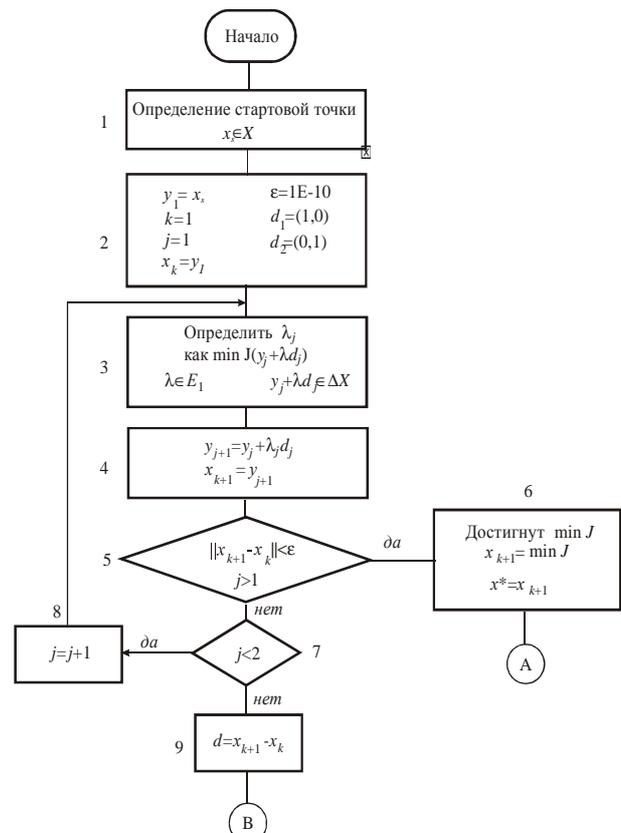


Рисунок 18 – Блок-схема алгоритма минимизации (часть 1)

На рис. 18 предложена блок-схема модификации этого метода для поиска минимума дискретно заданной нелинейной целевой функции – функционала J в ограниченной области Δx . В блоке 1 рассчитываются координаты стартовой точки. В блоке 2 задаются: точность ϵ поиска минимума, вводятся векторы d_1, d_2 – орты координатных направлений, а также начальные значения некоторых вспомогательных переменных.

В блоке 3 решается задача поиска минимума в направлении $y_j + \lambda d_j$, где λ – искомое число. Это задача поиска минимума в одномерной ограниченной области. Поиск выполняется на основе комбинации метода золотого сечения и последовательной параболической интерполяции. Метод изложен ниже.

В блоке 4 формируется точка x_{j+1} как следствие

решения задачи минимизации предыдущего блока. То есть x_{j+1} – это точка на пути спуска к минимуму.

Сравнения расстояния между точками спуска выполняются в блоке 5. Причем сравнения выполняются не для соседних точек, а через одну точку. Это связано с необходимостью спуска как по одной координате, так и по второй. Лишь после этих спусков нужно сравнивать точки минимумов. В другом случае сравнения соседних точек минимумов могут показать незначительные перемещения вдоль одной координаты, тогда как функция существенно уменьшается вдоль второй координаты. Как следствие, будет рассчитана точка минимума, которая находится на значительном расстоянии от реального минимума.

Если расстояние между соответствующими точками минимума меньше заданной точности ε , то считаем, что достигнут минимум целевой функции. Последняя точка спуска x_{k+1} является точкой минимума. В ином случае, в блоке 6 проверяем, был ли спуск по обеим координатам. Если нет, то возвращаемся на начало блока 3 и выполняем спуск по второй координате. Иначе – в блоке 8 формируется новое направление спуска – вдоль вектора $d = x_{k+1} - x_k$. Это направление разрешает ускорить спуск для функций с участками, которых похожие на овраг.

В блоке 9, аналогично блоку 3, рассчитывается минимум функции вдоль направления $x_{k+1} + \lambda d$. Потом в блоке 10 формируется следующая точка минимума целевой функции соответственно результатам одномерной минимизации в предыдущем блоке. Рассчитанная точка минимума x_{k+1} сравнивается с соответствующим минимумом x_k . Если точность расчетов поиска минимума удовлетворительная (блок 11), то считаем, что минимум функционала достигнут, и процесс поиска прекращается. Иначе в качестве стартовой точки выбирается последняя точка минимума, и процесс поиска следующей точки минимума повторяется из блока 3.

Модификация метода (то есть его новизна) состоит в следующем:

- в новом алгоритме определения стартовой точки для поиска минимума в многомерной ограниченной области;
- в решении задачи поиска минимума в одномерной ограниченной области на основе использования комбинации метода золотого сечения и последовательной параболической интерполяции.

Рассмотрим поэтапное выполнение метода в соответствии с упрощенной блок-схемой на рис. 18, 19.

Другими словами, стартовая точка размещена ближе к узлам с меньшими значениями целевой функции. В целом возможно осуществлять поиск минимума: раздробить клетку на сетку клеток и повторить поиск клетки с минимальными значениями функционала, как описано выше. В работе [6] показано, что этот метод (метод вложенных разбинок для глобальной оптимизации) сходится со скоростью 1. Для решения нашей задачи это довольно низкая скорость. В качестве ограничений поиска на первом этапе считаем границу клетки, в которой расположена стартовая точка. Если минимум

будет достигнут на границе клетки, процесс поиска минимума повторяется в соседней клетке, на границе с которой получен минимум. В этом случае стартовой точкой будет точка минимума, полученная в предыдущей клетке.

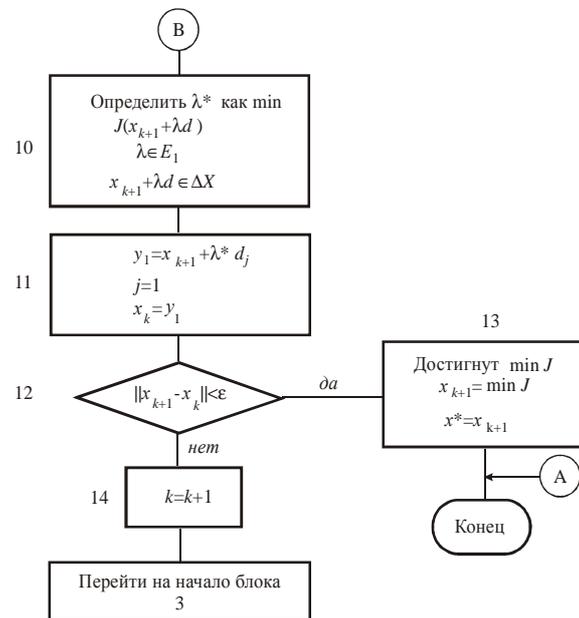


Рисунок 19 – Блок-схема алгоритма минимизации (часть 2)

В блоке 1 определяется стартовая точка x_s . Идея расчета стартовой точки состоит в следующем. В цикле анализируем каждую клетку сетки, на которой задана целевая функция. Для клетки рассчитывается среднее арифметическое значение f_a функции в узлах клетки. Находим клетку, для которой f_a является наименьшим. Тогда стартовая точка рассчитывается как

$$x_s = a_1 r'_1 + a_2 r'_2 + a_3 r'_3 + a_4 r'_4,$$

где

$$a_i = 1 - J_i / (J_1 + J_2 + J_3 + J_4);$$

$$r'_i = 1 - (J_1 + J_2 + J_3 + J_4) / 4 - r_i;$$

r_i – радиус-вектор i -го узла клетки ($i = 1, 2, 3, 4$);

J_i – значения целевой функции в i -му узле ($i = 1, 2, 3, 4$).

В блоках 3, 10 (см. рис. 18, 19) для поиска минимума двумерной целевой функции используется метод минимизации одномерной функции. Далее изложен один из таких методов, который был использован для решения общей задачи поиска оптимальных параметров нелинейного дискретного функционала. Этот метод основан на комбинации метода золотого сечения и последовательной параболической интерполяции. Исходными данными метода являются интервал поиска Δx_1 , функция расчета f_1 и граница погрешности ε .

Интервал поиска Δx_1 рассчитывается соответственно следующему алгоритму.

1) В алгоритме на рис. 18, 19 поиск одномерной функции выполняется в направлениях $y_j + \lambda d_j$ (блок 3), $x_{k+1} + \lambda d$ (блок 10). Проводим прямую линию вдоль указанного направления.

2) Рассчитываем две точки p_1, p_2 сечения прямой с линиями границы клетки.

3) Систему координат для одномерной оптимизации расположим таким образом, что начало координат совпадает с точкой p_1 , а положительная ось x – от точки p_1 к точке p_2 . Переносим ось значений функционала J в точку p_1 . Эта ось отвечает значениям функции f_1 .

4) Плоскость изменения одномерной функции расположена в разрезе трехмерной области поиска минимума функционала J плоскостью, которая проходит через ось x и ось значений функции f_1 .

Функция f_1 представляет собой целевую функцию J , у которой параметры изменяются только вдоль новой оси x . Ограничения для поиска минимума функции f_1 являются интервал на оси x : от 0 к числу A , равный расстоянию между точками p_1, p_2 . Граница погрешности ϵ совпадает с погрешностью поиска минимума для двумерной целевой функции.

Алгоритм поиска минимума x состоит в постепенном сужении интервала, в котором находится минимум. Начальным интервалом поиска является $[0, A]$. Таким образом, задача сводится к тому, чтобы найти в $[0, A]$ множество абсцисс x_1, x_2, \dots, x_k , в которых рассчитывается такая функция, оптимальное значение f_1 которой лежит и в интервале $x \in [x_i, x_{i+1}]$. Такой интервал называется интервалом неопределенности.

Для поиска интервала неопределенности в данной работе применялся метод золотого сечения, который имеет линейную сходимость.

Для поиска минимума функции f_1 метод золотого сечения используется в комбинации с методом последовательной параболической интерполяции. Рассмотрим этот метод. Метод начинается с трех произвольных действительных чисел v_1, v_2, v_3 . В общем случае имеем числа v_{k-2}, v_{k-1}, v_k . Пусть v_{k+1} – абсцисса вершины параболы (с вертикальной осью), проходящей через точки $(v_i, f_i(v_i), i = k-2, k-1, k)$. Продолжаем итерации с числами v_{k-2}, v_{k-1}, v_k . Для близких к минимуму начальных приближений этот метод имеет сходимость порядка 1,324.

Таким образом, комбинация двух методов одномерной оптимизации позволяет ускорить поиск минимума целевой функции. Разные авторы методов и алгоритмов нелинейной оптимизации использовали для их проверки большое количество тестовых задач. Некоторые из этих тестов использовались так часто, что стали фактически стандартом для тестирования, поскольку много раз применялись для сравнения качества работы разных алгоритмов. Как правило, эти сравнения выполнялись, чтобы показать, что новый алгоритм не хуже или лучше предыдущего.

Изложенный в данной работе алгоритм оптимизации тестировался на 12 функциях, описанных в [6]. На рис. 20, 21 приведены две из этих целевых функций. Рассмотрим результаты тестирования по каждой из этих функций.

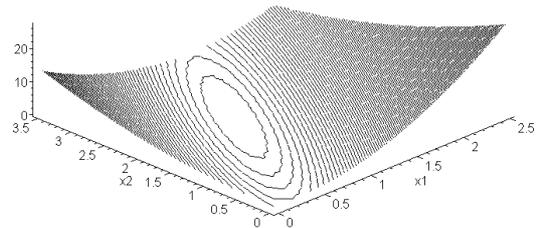
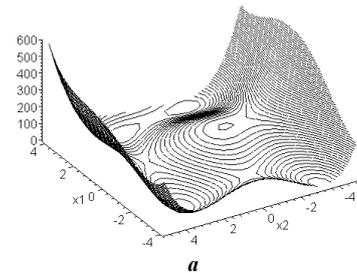
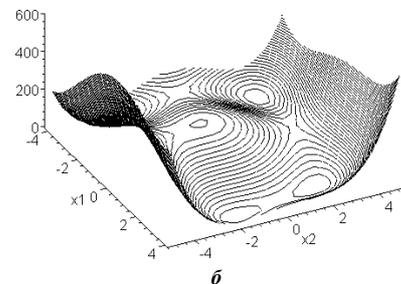


Рисунок 20 – Случай функции с "оврагом"



а



б

Рисунок 21 – Случай функции с несколькими минимумами

На рис. 20 изображена функция

$$J(x_1, x_2) = (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 2x_1)^2. \quad (1)$$

Эта функция привлекает внимание прежде всего тем, что ее минимум (точка $(1, 2)$, $J(1, 2) = 0$) находится на участке поверхности, которая имеет вид оврага. Причем этот овраг тянется вдоль линии $2x_1 = x_2$. Для метода координатного спуска такого класса целевые функции являются наименее благоприятными для поиска минимума. Но модифицированный метод Хука-Дживса справляется с этой задачей. В табл. 1 приведены результаты поиска минимума данной функции $(x_{1s}, x_{2s}) = (1, 4; 2, 3)$ – стартовая точка, $\epsilon = 1E-10$ – точность, а на рис. 22 – графическое изображение поиска минимума. В соответствии с алгоритмом (см. рис. 18, 19) на первом шаге работы программы были рассчитаны координаты узлов клетки поиска минимума в области $\{0,5 \leq x_1 \leq 2,5; 0,5 \leq x_2 \leq 3,5; \Delta x_1 = 1, \Delta x_2 = 1\}$, а именно: $\{(0,5; 1,5; 0,5), (1,5; 1,5; 2,5), (1,5; 2,5; 0,5), (0,5; 2,5; 2,5)\}$.

Для расчета момента завершения вычислительной процедуры была применена довольно высокая точность $\epsilon = 10^{-10}$. На реальных данных такая точность, как правило, не используется. Но для тестирования алгоритма в целом важно изучить поведение алгоритма при условии жестких требований к точности расчетов. Практически для всех стартовых точек, начиная с десятого шага, точки спуска попадают в область минимума с $\epsilon = 10^{-2}$. Далее продолжают очень медленные перемещения к минимуму. Этот путь занимает от 55 до 65 шагов спуска.

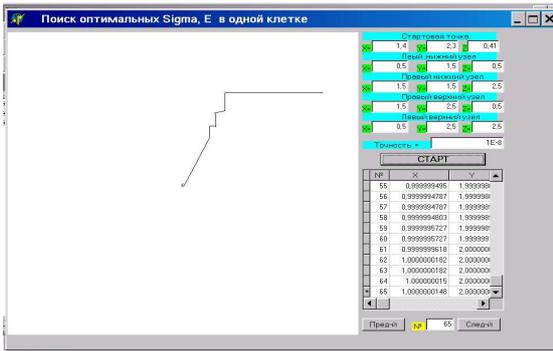


Рисунок 22 – Путь поиска минимума функции

$$J(x_1, x_2) = (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 2x_1)^2$$

Рассмотрим вторую целевую функцию тестирования (см. рис. 21):

$$J(x_1, x_2) = [(x_1)^2 + x_2 - 11]^2 + [x_1 + (x_2)^2 - 7]^2 \quad (2)$$

Таблица 1 – Результаты поиска минимума функции $J(x_1, x_2) = (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 2x_1)^2$

№ п/п	$J(x_1, x_2) = (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 2x_1)^2$		
	x_1	x_2	$J(x_1, x_2)$
1	1,4	2,3	0,41
2	1,12	2,3	0,018
3	1,12	2,24	0,0144
4	1,0913520097	2,2338611449	0,0109622412
5	1,093544458	2,2338611449	0,010938207
6	1,093544458	2,187088916	0,0087505656
7	1,0933729566	2,1907476114	0,0087345226
8	1,0762990446	2,1907476114	0,0072769303
9	1,0762990446	2,1525980891	0,0058215442
10	1,0039729866	1,9909945533	0,0003031353
		...	
63	1,0000000182	2,0000000018	8,6482675897766E-17
64	1,0000000150	2,000000 0019	7,133834270713E-16
65	1,0000000148	2,0000000019	4,290775105632E-16

Таблица 2 – Результаты поиска минимума функции

$$J(x_1, x_2) = [(x_1)^2 + x_2 - 11]^2 + [x_1 + (x_2)^2 - 7]^2$$

№ п/п	$J(x_1, x_2) = [(x_1)^2 + x_2 - 11]^2 + [x_1 + (x_2)^2 - 7]^2$		
	x_1	x_2	$J(x_1, x_2)$
1	1	1	106
2	3,2293912229	1	7,8602862581
3	3,2293912229	1,8506452995	1,7569321922
4	3,0765688401	1,7923344745	0,5718389794
5	3,054133731	1,7923344745	0,5522967098
6	3,054133731	1,9674476292	0,0927589281
7	3,0521873335	1,9826398804	0,08938209
8	3,0046775202	1,9826398804	0,0042703618
9	3,0046775202	1,9972433859	0,000681841
10	3,0001941486	1,9986214789	2,83271E-5
		...	
30	3,0000000027	1,9999999984	6,2211031501087E-15
31	3,0000000022	1,9999999984	1,2319681489144E-14
32	3,000000002	1,9999999984	1,1120729406087E-14

С точки зрения поиска минимума эта функция интересна тем, что имеет четыре локальных минимума. На этом тесте проверяется эффективность метода в условиях существования нескольких локальных

минимумов.

Исходные данные для теста следующие:

- точка глобального минимума: (3,2), где $J(3,2) = 0$;
- область поиска: $\{-4 \leq x_1 \leq 4; -5 \leq x_2 \leq 5; \Delta x_1 = 2; \Delta x_2 = 2\}$;
- точность поиска минимума для стартовых точек: $\epsilon = 10^{-8}$.

Рассчитаны координаты узлов клетки поиска минимума: $\{(2,1;5,2); (4,1;40); (4,3;100); (2,3;32)\}$.

В табл. 2 приведенные результаты поиска минимума данной целевой функции $((x_{1s}, x_{2s}) = (1, 1); \epsilon = 1E-8)$. На рис. 23 отображено графическое представление шагов метода поиска минимума в выбранной клетке сетки для соответствующей стартовой точки. В область минимума с точностью $\epsilon = 10^{-2}$ точки спуска попадают начиная с 5-6 шага для всех стартовых точек. Глобальный минимум достигается за 26-32 шага с точностью $\epsilon = 10^{-8}$.

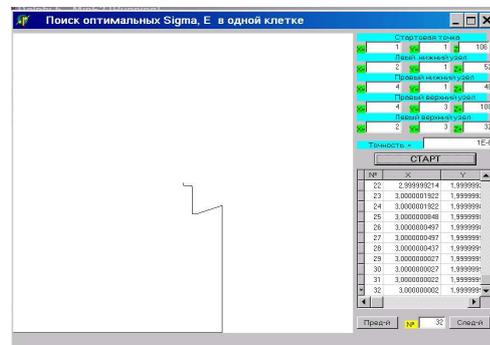


Рисунок 23 – Путь поиска минимума функции (2)

Сравнения результатов поиска минимума для функций (1), (2) показывают, что уменьшение точности на два порядка (с $\epsilon = 10^{-10}$ до $\epsilon = 10^{-8}$) сокращает количество шагов к точке минимума более чем в 2 раза (с 65 до 26). В то же время поиск промежуточных точек спуска к минимуму для реального функционала расчета НДС сложного трехмерного механического объекта требует значительно больше времени, чем для тестовых функций. Поэтому нужно максимально ускорить процедуру поиска промежуточных точек минимума, в особенности для расчета минимума с точностью, высшей чем 10^{-2} .

Очевидно, для расчета минимума в области, близкой к точке минимума, нужно использовать другой метод оптимизации. В дальнейшем развитии метода был использован метод Ньютона в непосредственной близости от точки минимума. Такой подход разрешил сократить количество шагов на пути к точке минимума приблизительно на порядок (табл. 3, 4; рис. 24, 25). В таблицах приведены результаты расчетов для входных данных (соответственно табл. 1, 2). На рис. 24, 25 отображенные шаги приближения к точке минимума согласно модификации метода соответственно данным табл. 3 $((x_{1s}, x_{2s}) = (0,5; 1,5); \epsilon = 1E-8)$, 4 $((x_{1s}, x_{2s}) = (1, 1); \epsilon = 1E-8)$.

Программа, которая разработанная на основе алгоритма поиска, написана в среде объектно-ориентированного программирования Delphi 5. На всех тестах точки минимума были рассчитаны практически мгновенно (1-2 сек).

Таблица 3 – Результаты поиска минимума функции

$$J(x_1, x_2) = (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 2x_1)^2$$

№ п/п	$J(x_1, x_2) = (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 2x_1)^2$		
	x_1	x_2	$J(x_1, x_2)$
1	0,5	1,5	0,5
2	0,8	1,5	0,05
3	0,8	1,6	0,04
4	0,8529411765	1,6176470588	0,0294117647
5	0,8470588235	1,6176470588	0,0292387543
6	0,8470588235	1,6941176471	0,0233910035
7	0,8477355544	1,6853201458	0,0232875034
8	1,0000000001	2,0000000002	9,9836936826551E-21
9	1	2	9,8607613152626E-32

Таблица 4 – Результаты поиска минимума функции

$$J(x_1, x_2) = [(x_1)^2 + x_2 - 11]^2 + [x_1 + (x_2)^2 - 7]^2$$

№ г/п	$J(x_1, x_2) = [(x_1)^2 + x_2 - 11]^2 + [x_1 + (x_2)^2 - 7]^2$;		
	x_1	x_2	$J(x_1, x_2)$
1	1	1	106
2	3,2293912229	1	1
3	3,2293912229	1,8506452996	7,8602862581
4	3,0765688401	1,7923344745	1,7569321922
5	3,054133731	1,7923344745	0,5718389793
6	3,054133731	1,9674476292	0,5522967097
7	3,0521873335	1,9826398804	0,0927589281
8	3,0013836236	1,9994352431	0,08938209
9	3,0000009862	1,999999663	6,06563E-5
10	2,9999999988	1,9999999983	3,1268134712261E-11
11	2,9999999988	1,9999999983	1,3681667815377E-16

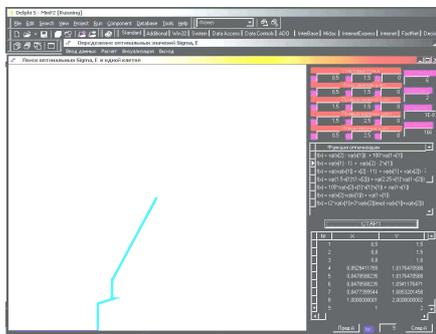


Рисунок 24 – Шаги приближения к точке минимума согласно модификации метода соответственно данным табл. 3

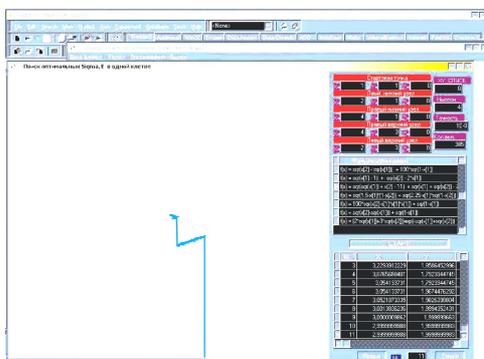


Рисунок 25 – Шаги приближения к точке минимума согласно модификации метода соответственно данным табл. 4

Использованные целевые функции для тестирования разработанной программы являются классиче-

скими для оценки эффективности реализованных методов нелинейной оптимизации. Точность и скорость работы программы поиска точек минимума тестовых функций подтверждают эффективность реализованного метода.

Таким образом, предложенная комбинация методов поиска минимума функционала несоответствия результатов исследования НДС элементов сложных механических систем является определенным образом оптимальным объединением методов, ориентированных на достижение экстремума с высокой скоростью и с высокой степенью гарантии.

Выводы

Проведенный комплекс расчетных и экспериментальных исследований подтвердил достоверность и точность работы отдельных модулей программно-аппаратного комплекса и позволяет сделать следующие выводы.

1. Предложенный в работах [1–3] подход к решению задачи синтеза численных моделей элементов объектов бронетанковой техники реализован в виде *сбалансированного* по составу, производительности, емкости аппаратного и программного обеспечения программно-аппаратного комплекса.

2. Разработанный СПАК дает возможность в автоматизированном режиме производить построение пространственных параметрических моделей и конечно-элементных сеток элементов объектов бронетанковой техники.

3. Исследователь в процессе расчетов и экспериментов имеет возможность корректировки процесса синтеза моделей на всех этапах исследований.

4. Тестовые расчеты подтвердили высокую эффективность и точность разработанного ПАК.

5. Разработанный программно-аппаратный комплекс построен на базе соединения возможностей современных эффективных методов, технологий аппаратных средств и программных комплексов, что в совокупности создает качественно новую среду автоматизации расчетно-экспериментального исследования элементов объектов бронетанковой техники.

Таким образом, создан реальный мощный инструмент решения любых задач анализа и синтеза для изготовления деталей объектов бронетанковой техники с обеспечением высокой точности и достоверности результатов.

Список литературы

1. Ткачук Н.А. Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения / Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакеев А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А. // Механика та машинобудування, 2005. – № 1. – С.184-194.
2. Ткачук Н.А. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н. // Механика та машинобудування, 2006. – № 1. – С.57-79.
3. Ткачук Н.А. Решения задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Э.В. Глушенко, А.В. Ткачук // Механика та машинобудування – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – №2. – С.85-96.
4. Донелл Г. Балки, пластины и оболочки / Донелл Г. – М.: Наука, 1982.

– 568 с.

5. Wood C.F. Application of "Direct Search" to the Solution of Engineering Problems / Wood C.F. – Westinghouse Res. Lab. Sci paper 6-41210-1-P1, 1960.
6. Shi Leyuan Nested partitions method for global optimizations / Shi Leyuan, Olafsson Sigurdur // Oper. Res. – 2000. – Vol.48. – No 3. – P. 390-407.

Bibliography (transliterated)

1. Tkachuk N.A. Struktura specializirovannyh integrirovannyh sistem avtomatizirovannogo analiza i sinteza jelementov transportnyh sredstv special'nogo naznachenija / Tkachuk N.A., Brul' S.T., Malakej A.N., Gricenko G.D., Orlov E.A. // Mehanika ta mashinobuduvannja, 2005. – No 1. – P.184–194.
2. Tkachuk N.A. Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnyh mehanicheskikh sistem: tehnologija avtomatizirovannoj generacii i parametrizirovannogo opisanija / Tkachuk N.A., Gri-cenko G.D.,

Chepurnoj A.D., Orlov E.A., Tkachuk N.N. // Mehanika ta mashinobuduvannja, 2006. – Npo1. – P. 57–79.

3. Tkachuk N.A. Reshenija zadach raschetno-jeksperimental'nogo issledovanija jelementov clozhnyh mehani-cheskih sistem / N.A. Tkachuk, G.D. Gricenko, Je.V. Glushhenko, A.V. Tkachuk // Mehanika ta mashinobuduvannja – Kharkov: NTU "KhPI", 2004. – No 2. – P.85–96.
4. Donell G. Balki, plastiny i obolochki / Donell G. – Moscow: Nauka, 1982. – 568 p.
5. Wood C.F. Application of "Direct Search" to the Solution of Engineering Problems / Wood C.F. – Westinghouse Res. Lab. Sci paper 6-41210-1-P1, 1960.
6. Shi Leyuan Nested partitions method for global optimizations / Shi Leyuan, Olafsson Sigurdur // Oper. Res. – 2000. – Vol.48. – No 3. – P. 390-407.

Надійшла (received) 10.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Комп'ютерний програмно-апаратний комплекс для аналізу і синтезу моделей елементів об'єктів бронетанкової техніки / Ткачук М.А., Климов В.Ф., Хлань О.В., Шейко О.І., Малакей А.М., Кохановський В.І., Грабовський А.В., Танченко А.Ю., Васильєв А.Ю., Бондаренко М.О., Зарубіна А.О., Набоков А.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ "ХПІ", 2017. – № 12 (1234). – С. 96–109. – Бібліогр. 6 назв. – ISSN 2079–0775.

Компьютерный программно-аппаратный комплекс для анализа и синтеза моделей элементов объектов бронетанковой техники / Ткачук Н.А., Климов В.Ф., Хлань А.В., Шейко А.И., Малакей А.Н., Кохановский В.И., Грабовский А.В., Танченко А.Ю., Васильев А.Ю., Бондаренко М.А., Зарубина А.А., Набоков А.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2017. – № 12 (1234). – С. 96–109. – Библиогр. 6 назв. – ISSN 2079–0775.

Computer software and hardware complex for analysis and synthesis of models of elements of objects of the armored vehicles / Tkachuk M.A., Klimov V.F., Khlan A.V., Sheiko O.I., Malakey A.N., Kokhanovskyi V.I., Grabovsky A.V., Tanchenko A.Yu., Vasiliev A. Y., Bondarenko M.A., Zarubina A.A., Nabokov A.V. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Engineering and CAD. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No 12 (1234). – P. 96–109. – ISSN 2079-0775.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ткачук Микола Анатолійович – доктор технічних наук, професор, НТУ "ХПІ", завідувач кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057)7076902; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Ткачук Николай Анатольевич – доктор технических наук, профессор, НТУ "ХПИ", заведующий кафедрой "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", тел.: (057) 7076902; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Tkachuk Mykola – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, NTU "KhPI", Chief of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057)7076902; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Климов Віталій Федорович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник, ДП "Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О.О. Морозова", Харків

Климов Виталий Федорович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник, ГП "Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А.А.Морозова", Харьков

Klimov Vitaly – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Principal Researcher State Enterprise "Kharkiv Machine Building Design Bureau named after AA Morozov "

Хлань Олександр Володимирович – генеральний директор ДП "Завод ім. В.О. Малишева", Харків, тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Хлань Александр Владимирович – генеральный директор ГП "Завод им. В.А. Малышева", Харьков, тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Khlan Oleksandr – General Director at SE "Malyshev Plant", Kharkov; tel.: (057) 7076902

Шейко Олександр Іванович – головний інженер, ДП "Завод ім. В.О. Малишева", Харків, тел. (057) 707-69-02.

Шейко Александр Иванович – главный инженер, ГП "Завод им. В.А. Малышева", Харьков, тел. (057) 707-69-02.

Sheyko Oleksandr – chief engineer at SE "Malyshev Plant", tel.: (057) 7076902, tma@tmm-sapr.org.

Малакей Андрій Миколайович – заступник генерального директора з якості ДП "Завод ім. Малишева", Харків; тел. (057) 784-40-08, e-mail: kanc@malyshev.kharkov.ua.

Малакей Андрей Николаевич – заместитель генерального директора по качеству ГП "Завод им. Малышева", Харьков; тел. (057) 784-40-08, e-mail: kanc@malyshev.kharkov.ua.

Malakei Andrii – deputy general director for quality at SE "Malyshev Plant", Kharkov; tel.: (057) 784-40-08, e-mail: NTU "KhPI", kanc@malyshev.kharkov.ua.

Кохановський Володимир Ілліч – кандидат технічних наук, керівник відділу впровадження CAD/CAM систем, ПАТ "У.П.Е.К.", тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Кохановский Владимир Ильич – кандидат технических наук, руководитель отдела внедрения CAD / CAM систем, ОАО "У.П.Э.К.", тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Kokhanovskyi Volodymyr – Ph.D., Head of Implementation of CAD/CAM-systems Department, UPEC Industrial Group, tel.: (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Грабовський Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ "ХПІ", старший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; тел.: (057)7076166; e-mail: andrej8383@gmail.com

Грабовский Андрей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НТУ "ХПИ", старший научный сотрудник кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел.: (057) 7076166; e-mail: andrej8383@gmail.com

Grabovskiy Andrey – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), NTU "KhPI", Senior Researcher of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, tel.: (057)7076166; e-mail: andrej8383@gmail.com

Танченко Андрій Юрійович– кандидат технічних наук, НТУ "ХПІ", докторант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", Харків; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: ATanchenko@tmm-sapr.org.

Танченко Андрей Юрьевич – кандидат технических наук, НТУ "ХПИ", докторант кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", Харьков; тел.: (057) 707-69-01; e mail: ATanchenko@tmm-sapr.org.

Tanchenko Andrii – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), NTU "KhPI", doctorante of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, Kharkiv; tel.: (057) 707-69-01; e-mail: ATanchenko@tmm-sapr.org.

Васильєв Антон Юрійович – кандидат технічних наук, НТУ "ХПІ", докторант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", Харків; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

Васильев Антон Юрьевич – кандидат технических наук, НТУ "ХПИ", докторант кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", Харьков; тел.: (057) 707-69-01; e mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

Vasiliev Anton – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), NTU "KhPI", doctorante of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, Kharkiv; tel.: (057) 707-69-01; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

Бондаренко Марина Олександрівна – НТУ "ХПІ", аспірант каф. "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: marina.bondarenko@tmm-sapr.org.

Бондаренко Марина Александровна – НТУ "ХПИ", аспирант каф. "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел.: (057) 707-69-01; e mail: marina.bondarenko@tmm-sapr.org.

Bondarenko Maryna – NTU "KhPI", postgraduate student of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01; e-mail: marina.bondarenko@tmm-sapr.org.

Зарубіна Алла Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, НТУ "ХПІ", професор кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01

Зарубина Алла Александровна – кандидат технических наук, доцент, НТУ "ХПИ", профессор кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", тел.: (057) 707-69-01

Zarubina Alla – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, NTU "KhPI", Professor of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01

Набоков Анатолій Володимирович – НТУ "ХПІ", аспірант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 7076901.

Набоков Анатолий Владимирович – НТУ "ХПИ", аспирант кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел.: (057) 7076901.

Nabokov Anatoliy – NTU "KhPI", post-graduate student of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01