

экспериментальных исследований, проведенная в работе, позволяет получить численную характеристику при сравнении полей перемещений точек элементов сложных механических систем.

5. Разработка единого формата данных для вычисления функционала несоответствия результатов численных и экспериментальных исследований дает возможность удобного и точного его вычисления.

Таким образом, предложенный подход после формализации основных этапов исследований при помощи соответствующего математического аппарата реализован в виде конечного числа задач, методы решения которых приведены в статье. Для перехода к решению конкретных задач разработанные методы должны быть реализованы в виде соответствующего программно-аппаратного комплекса.

В сочетании с голографической установкой, специальным программным обеспечением, оригинальными подсистемами автоматизированного анализа и синтеза на основе авторских разработок, а также лицензионными версиями CAD/CAM/CAE Pro/ENGINEER, ANSYS, SolidWorks, LS-DYNA, данный программно-аппаратный комплекс представляет собой мощный инструмент анализа поведения механических объектов различной природы.

Список литературы: 1. *Ткачук Н.А.* Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем // Динамика и прочность машин. – 1998. – Вып. 56. – С.175-181. 2. *Ткачук Н.А.* Экспериментальное определение параметров конечно-элементных моделей // Механика та машинобудування. – 1998. – № 1. – С.68-75. 3. *Капустин А.А., Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ – 1999. – вып.53. – С.148-155. 4. *Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Глуценко Э.В., Ткачук А.В.* Решения задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем // Механика та машинобудування. – 2004. – № 2. – С.85-96. 5. *Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Липовецкий Л.С., Глуценко Э.В., Гоголь Н.А.* Методика экспериментального исследования элементов механических систем методом голографической интерферометрии // Механика та машинобудування. – 2005. – №1. – С.88-99. 6. *Лурье А.И.* Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с. 7. *Работнов Ю.Н.* Механика деформированного твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с. 8. *Васидзу К.* Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с. 9. *Сей Ж.* Оптимизация. Теория и алгоритмы. – М.: Мир, 1973. – 244 с. 10. *Черноузько Ф.Л., Баничук Н.В.* Вариационные задачи механики и управления. – М.: Наука, 1973. – 240 с. 11. *Марчук Г.И.* Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1980. – 536 с. 12. *Кравчук А.С.* К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Доклады АН СССР. – 1976. – Т.230. – № 2. – С.308-310. 13. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1974. – 224 с. 14. *Стрэнг Э., Фикс Дж.* Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 349 с. 15. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. – 504 с. 16. *Капустин А.А.* Теория спекл-интерферометрических измерений напряженно-деформированного состояния элементов натуральных конструкций. – В кн.: Физические основы голографии. Л.: ЛИЯФ, 1979. – С.137-159.

Поступила в редколлегию 25.05.2007

УДК 539.3

Н.А. ТКАЧУК, докт. техн. наук, *Г.Д. ГРИЦЕНКО*, канд. техн. наук, НТУ „ХПИ”, *А.В. НЕЧЕПУРЕНКО*, канд. техн. наук, ОАО „МК „Азовсталь””, г. Мариуполь, *В.И. ГОЛОВЧЕНКО*, канд. техн. наук, *В.А. ШКОДА*, канд. техн. наук, ОАО “Головной специализированный конструкторско-технологический институт”, г. Мариуполь

СТРУКТУРА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Запропоновано методи, алгоритми і програмне забезпечення для моделювання, аналізу і параметричної оптимізації елементів механічних систем. Запропонована система автоматизованого аналізу елементів механічних систем робить можливим знаходження параметрів проектування, які забезпечують відповідний рівень міцності, ресурсу, жорсткості і мінімальної матеріалоемності.

It is proposed the methods, algorithms and software for modeling, analysis and parameter optimisation of the mechanical systems elements. The offered system of the elements of the mechanical systems automatic analysis make it possible to find design parameters which provide for appropriate level of the strength, resurs, hardness and minimal material intensity.

Введение. Совершенствование характеристик точности, надежности, ресурса, материалоемкости, долговечности, нагрузочной способности новых видов современных механических систем требует применения эффективных численных методов расчета их напряженно-деформированного состояния с учетом реальных условий эксплуатации. Для решения этой задачи используются как мощные специализированные пакеты типа ANSYS, NASTRAN, COSMOS, так и специализированные модули в больших CAD-системах (например, в системе Pro/ENGINEER). Наряду с несомненными достоинствами и преимуществами (универсальность, наличие большой библиотеки моделей, типов конечных элементов, удобства графического ввода и визуализации информации), они требуют значительного объема ресурсов от компьютеров и достаточно высокой квалификации пользователей.

В то же время для многих видов проектно-технологических работ используются специализированные программные пакеты, учитывающие специфику объектов конструирования, обладающие достаточными средствами моделирования при умеренных запросах к ресурсам компьютеров. Для такого типа пакетов одной из наиболее приемлемых схем исследования прочностных, жесткостных, динамических характеристик является технология, предусматривающая разбивку исследуемых объектов на отдельные подсистемы, моделирование, анализ и оптимизацию данных подсистем, а после этого – сборку синтетической модели и проведение значительно меньшего по объему числа исследований полной модели.

При этом необходимо автоматизировать как процессы создания твердотельной модели, так и расчетных моделей, а также взаимообмен данными между отдельными блоками моделирования и анализа. Это дает возможность проводить параметрическую оптимизацию исследуемых элементов конструкций с автоматическим внесением изменений.

Таким образом, описанный подход является в настоящее время наиболее приемлемым как для мощных, универсальных по возможностям и охватываемым классам конструкций, так и для специализированных, ориентированных на отдельные группы элементов, систем автоматизированного проектирования машиностроительных конструкций [1-4]. В данной работе ставится задача разработки конкретных вариантов структур специализированных систем автоматизированного анализа и синтеза сложных пространственных систем.

Структура системы. В предложенном подходе четко выделяются 3 стадии решения задач: *моделирование; построение достоверной расчетной модели; выбор рациональных параметров.* Первый из этапов предполагает создание в том или ином формате модели проектируемой детали, узла, агрегата. Это может быть осуществлено при помощи средств систем автоматизированного проектирования, хотя в отдельных случаях требуется создание специализированного программного обеспечения. Второй и третий этапы предполагают использование либо оригинального программного обеспечения, либо универсальных пакетов.

Поскольку при моделировании, анализе и синтезе сложных механических систем большой выигрыш времени дает исследование моделей в интегрированных системах автоматизированного проектирования, изготовления и исследования, представляется целесообразным интегрировать разработанное программное обеспечение в процесс создания новых механических систем хотя бы на уровне создания исходных параметров и структуры модели. Это на порядок ускоряет осуществление данных этапов, причем получаемые модели более адекватны тем или иным специфическим условиям нагружения, сопряжения и эксплуатации. В частности, большие возможности для решения указанной проблемы предоставляет система Pro/ENGINEER.

Система Pro/ENGINEER обеспечивает многофункциональный подход к автоматизации проектирования, исследования и изготовления элементов сложных машиностроительных конструкций. Он основан на использовании параллельного проектирования, что предполагает одновременно с разработкой концепции изделия проработку деталей и узлов, проведение расчетных исследований, а также структурной и параметрической оптимизации, выполнение чертежей, разработку технологических процессов и проектирование необходимой оснастки и инструмента.

Для данной системы в числе прочих характерны следующие особенности: *полная ассоциативность*, которая означает, что любые изменения, внесенные на любой стадии проектирования, распространяются на весь проект; *параметрическое моделирование, основанное на операциях*, которое позволяет созда-

вать геометрию объекта при помощи блоков – интеллектуальных *операций*; параметризация создаваемых моделей позволяет связать различные характеристики изделия, при этом изменение одной из них влечет за собой согласованное изменение других, с ней связанных.

Указанные выше свойства позволяют организовать в среде Pro/ENGINEER взаимосвязанный процесс „моделирование – анализ – оптимизация”, который органично вписывается в его структуру и функциональные возможности. Структурно данный процесс может обеспечиваться или путем параллельного использования специализированных пакетов для проведения тех или иных исследований проектируемого объекта, или при помощи встроенных модулей функционального моделирования (Pro/MECHANICA STRUCTURE, Pro/MECHANICA VIBRATION, Pro/MECHANICA MOTION и др.). В первом случае для обмена данными используются различные структуры импорта-экспорта данных, во втором случае используется единая внутренняя база данных проекта Pro/ENGINEER.

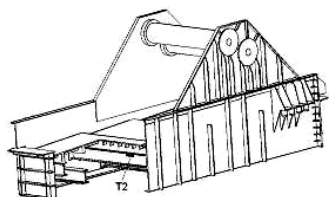
Предлагаемый подход представляет мощный инструмент ускорения проектирования, повышения эффективности принятия решений при выборе основных параметров изделий. Кроме того, обеспечивается наглядность представления получаемых результатов. Картина распределения искомых функций накладывается на реалистичную объемную модель объекта, обозначаются области, в которых удовлетворяются (не удовлетворяются) выбранные критерии прочности, долговечности или жесткости. Предоставляется возможность отслеживания протекания процесса в динамике с той или иной степенью плавности.

Особую актуальность и значимость предлагаемый подход приобретает для моделирования, анализа и синтеза элементов технологических систем, подъемно-транспортного и энергетического оборудования, транспортных средств, которые характеризуются повышенными требованиями к прочности, надежности, ресурсу, металлоемкости, а сроки, отведенные на их проектирование и исследование, постоянно снижаются. Имея мощные инструменты для работы с объектами сложной формы, Pro/ENGINEER позволяет легко варьировать геометрические параметры. Для обоснованного выбора тех или иных параметров необходимо производить многовариантные расчеты, учитывая при построении различных моделей соответствующие физические процессы.

Примеры применения. Рассмотрим некоторые примеры реализации предложенной структуры исследований.

1. *При моделировании рабочих процессов в выбивной машине (ВМ) для крупного вагонного литья* (рис. 1) строится ее обобщенная параметрическая модель [5, 6], включающая массово-инерционные характеристики машины, структуру и параметры металлоконструкции, массово-жесткостные характеристики земляного кома с отливкой, величину дебаланса и рабочую частоту вращения дебалансных валов. Доля организации исследований создается специализированный программно-модельный комплекс (ПМК), включающий подсистемы моделирования динамики, анализа НДС металлоконструкции ВМ

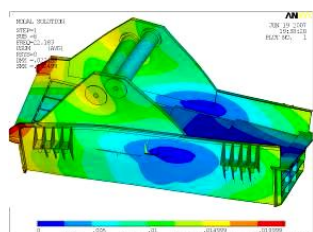
и параметрического синтеза, а также соответствующие параметрические и конечно-элементные модели (см. рис.1). С использованием данного ПМК возможно проведение всего комплекса исследований.



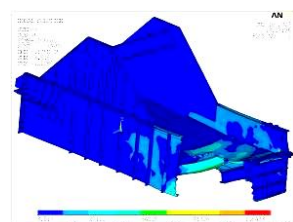
Геометрическая модель металлоконструкции корпуса выбивной машины



Подсистема анализа динамических процессов и параметрического синтеза выбивной машины



Вторая деформационная форма собственных колебаний корпуса ВМ



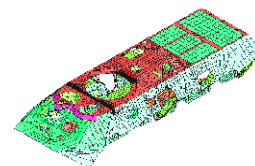
Деформированное состояние металлоконструкции при динамическом воздействии технологического груза (ком с отливкой)

Рис. 1. Элементы программно-модельного комплекса для моделирования динамики, напряженно-деформированного состояния и оптимизации параметров выбивной машины для выбивки крупного вагонного литья

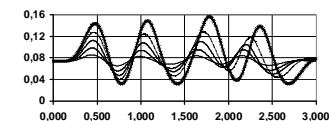
2. Процесс проектирования и модернизации легкобронированных машин [3, 4, 7-9] содержит в качестве основных этапов: геометрическое моделирование, обоснование компоновки, параметров подвески, корпуса, характеристик двигателя и т.д. В этой разветвленной сети задач можно выделить отдельные проблемные вопросы. В частности, большое значение имеет вопрос выбора конструкции и параметров бронекорпусов. В свою очередь это напрямую увязано с определением динамических усилий, действующих на корпус со стороны подвески и боевого модуля. В связи с этим специализированный программно-модельный комплекс включает подсистемы анализа динамических процессов в боевой машине, определения НДС бронекорпуса и оптимального выбора его параметров (рис. 2).

3. Решение задачи оптимального проектирования ветроэнергетических установок (ВЭУ) большой мощности во многом зависит от решения задач по обеспечению ресурса, долговечности и высокой нагрузочной способности сварных рам, содержащих основное оборудование ВЭУ [10-12]. Для решения данной задачи разработан специализированный программно-модельный комплекс с подсистемами геометрического моделирования, конечно-элементного анализа НДС

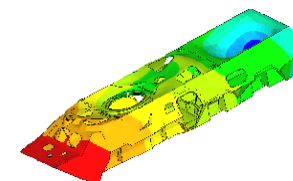
и оптимизации конструктивно-технологических параметров рам ВЭУ S70/77 германской фирмы "Nordex" (рис. 3).



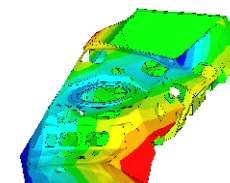
Подсистема геометрического и конечно-элементного моделирования: КЭМ корпуса БТР-94



Подсистема анализа динамических процессов: вертикальные перемещения корпуса БТР при переезде единичной неровности со скоростью 2,7 м/с, м

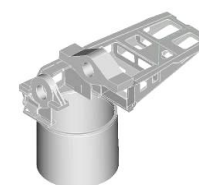


Подсистема конечно-элементного анализа: деформированное состояние бронекорпуса



Подсистема конечно-элементного анализа: форма колебаний бронекорпуса

Рис. 2. Элементы программно-модельного комплекса для автоматизированного анализа и синтеза бронекорпусов легкобронированных машин (на примере бронетранспортера БТР-94)



Подсистема геометрического и конечно-элементного моделирования: геометрическая модель рамы

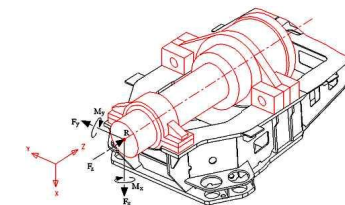
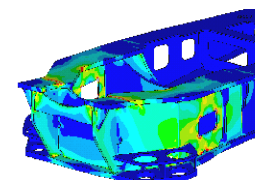
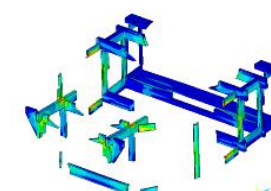


Схема приложения внешних нагрузок



Подсистема конечно-элементного анализа: напряженное состояние рамы ВЭУ



Подсистема конечно-элементного анализа: напряженное состояние сварных швов рамы ВЭУ

Рис. 3. Этапы анализа и синтеза рамы ВЭУ большой мощности с применением специализированного программно-модельного комплекса

Представленные примеры реализации специализированных программно-

модельных комплексов базируются на оригинальном математическом обеспечении метода обобщенного параметрического описания механических систем [3, 4], на технологии блочно-модульного построения специализированных систем автоматизированного анализа и синтеза машиностроительных конструкций, а также на широких возможностях, предоставляемых CAD/CAM/CAE-системами Pro/ENGINEER, ANSYS, SolidWorks, COSMOS и др.

Заключение. Представленные модели и результаты, имея иллюстративный характер, тем не менее дают возможность ощутить преимущества технологии „моделирование – анализ – синтез”, реализуемой в среде специализированных систем автоматизированного анализа и синтеза сложных механических конструкций путем взаимобмена данными между подсистемами моделирования, анализа и синтеза с привлечением экспериментальных данных и специализированных программных модулей и мощных систем CAD/CAM/CAE.

В качестве основных направлений дальнейших исследований можно выделить: оптимизацию структуры создаваемых специализированных систем автоматизированного анализа и синтеза; верификацию создаваемых расчетных моделей исследуемых объектов; решение конкретных задач анализа и синтеза.

Статья написана в рамках выполнения гранта НЧ/429-2007 „Вітроенергетичні установки: теоретичні основи методів моделювання та підвищення ресурсу силових елементів конструкцій”, выполняемого НТУ „ХПИ” по Государственной научно-технической программе „Ресурс”, а также гранта № ГТ/480-2007 „Розробка теоретичних основ комп’ютерних кластерних технологій та унікального програмно-апаратного комплексу для дослідження складних та надскладних механічних систем”, выполняемого НТУ „ХПИ” по Государственной научно-технической программе „Информационные и коммуникационные технологии в образовании и науке на 2006-2010 годы” по заказу Министерства образования и науки Украины.

Список литературы: 1. *Ткачук Н.А.* Системный подход к проектированию, анализу и синтезу элементов механических систем // Сб. науч. тр. ХГПУ „Информационные технологии: наука, техника, образование, здоровье”. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып.7. – С.377-381. 2. *Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Липовецкий Л.С., Глуценко Э.В., Гоголь Н.А.* Методика экспериментального исследования элементов механических систем методом голографической интерферометрии // Механіка та машинобудування. – 2005. – №1. – С.88-99. 3. *Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А.* Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения. // Механіка та машинобудування. – 2005. – № 1. – С.184-194. 4. *Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н.* Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.57-79. 5. *Барчан Е.Н.* Методы, модели и алгоритмы для синтеза параметров выбивной инерционной машины на основе моделирования динамических процессов // Вісник НТУ „ХПИ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”– Харків: НТУ „ХПИ”, 2007. – № 3. – С.3-17. 6. *Барчан Е.Н.* Совершенствование конструкции выбивной машины в составе автоматизированной линии крупного вагонного литья на основе расчетно-экспериментальных исследований рабочего процесса // Вісник НТУ „ХПИ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”– Харків: НТУ „ХПИ”, 2007. – № 23. – С.3-25. 7. *Гриценко Г.Д., Гладких В.И., Капустин А.А., Орлов Е.А., Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов механических систем: математическое, численное и экспериментальное моделирование // Вісник НТУ „ХПИ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”– Харків: НТУ „ХПИ”, 2005. – № 60. – С.44-67. 8. *Гриценко Г.Д., Бруль С.Т., Ткачук А.В.* Специализированная система автоматизированного анализа прочности и жесткости корпусов легкоброниро-

ванных машин для выбора их рациональных конструктивных параметров при импульсном воздействии от усилия стрельбы // Вісник НТУ „ХПИ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”– Харків: НТУ „ХПИ”, 2006. – № 3. – С.10-20. 9. *Гриценко Г.Д., Малакей А.Н., Ткачук Н.А.* Экспериментальное исследование элементов корпусов БТР-80 // Вісник НТУ „ХПИ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”– Харків: НТУ „ХПИ”, 2006. – № 33. – С.23-27. 10. *Головченко В.И.* Многовариантные исследования напряженно-деформированного состояния рамы ветроэнергетической установки большой мощности // Вісник НТУ „ХПИ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”– Харків: НТУ „ХПИ”, 2006. – № 3. – С.21-48. 11. *Головченко В.И., Барчан Е.Н., Пеклич М.М., Ткачук А.Н.* Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния пространственных крупногабаритных конструкций // Вісник НТУ „ХПИ”. Тем. вип.: „Машинознавство та САПР”– Харків: НТУ „ХПИ”, 2006. – № 3. – С.49-57. 12. *Васильев А.Ю., Ткачук М.М., Головченко В.И.* Напряжено-деформированный стан просторовых конструкций: методы автоматизированного анализа // Машинознавство. – Львів: ТУ „Львівська політехніка”, 2006. – № 1. – С.23-28.

Поступила в редколлегию 25.05.2007

УДК 539.3:612.76:616.001

Н.А. ТКАЧУК, докт. техн. наук, НТУ „ХПИ”, **В.К. ПИОНТКОВСКИЙ**, городская больница, г. Хмельницкий, **В.И. ФЕДАК**, областная больница, г. Ивано-Франковск, **Ю.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК**, НТУ „ХПИ”

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

У статті викладено основи розрахунково-експериментальної технології визначення напружено-деформованого стану елементів біомеханічних систем. На прикладі сегмента хребта проілюстровані потенційні можливості запропонованої технології. Наведені результати досліджень.

Bases of computational and experimental technology of determination of the stressed-deformed state of elements of the biomechanical systems are expounded in the article. On the example of segment of spine potential possibilities of the offered technology are illustrated. The results of researches are presented.

Введение. Исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов биомеханических систем (БМС) уделяется в последнее время особое внимание в связи со значительным распространением операций эндопротезирования. Так, в работах [1-9] описаны постановка задачи, расчетные схемы и модели для исследования НДС сегментов позвоночного столба с эндопротезами. Используется, в основном, метод конечных элементов (МКЭ) [10] и экспериментальные установки с оптической системой измерения линейных и угловых перемещений элементов системы друг относительно друга. В то же время в этих работах уделяется недостаточно внимания исследованию НДС сегментов позвоночника, замещающих опоры и диски элементами. В связи с этим предлагается для решения актуальной и важной задачи разработать соответствующую техно-