

УДК 539.3

Н.А. ТКАЧУК<sup>1</sup>, Л.С. ЛИПОВЕЦКИЙ<sup>2</sup>, В.И. КОХАНОВСКИЙ<sup>2</sup>, Г.Л. ФЕДОРЕНКО<sup>2</sup>,  
Н.А. ГОГОЛЬ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Национальный технический университет «ХПИ», Украина*

<sup>2</sup> *Харьковский государственный сервис-центр «СТЭМ», Украина*

<sup>3</sup> *Таврическая государственная агротехническая академия, Украина*

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНО-ШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Предложена схема определения значимых факторов расчетных моделей элементов машиностроительного оборудования (МО), в частности – горно-шахтного оборудования, по результатам экспериментальных исследований. Для изучения влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров на напряженно-деформированное состояние наиболее нагруженных и ответственных деталей МО предлагается проводить комплекс экспериментальных исследований, в которых при варьировании условий определяется реакция исследуемого объекта. При этом оказывается возможным построение сбалансированных расчетных моделей элементов механических систем с необходимым уровнем детализации. Предложена схема интенсификации процесса построения расчетных моделей МО на этапе экспериментальных исследований.

**автоматизированное проектирование, метод конечных элементов, метод спекл-голографической интерферометрии**

### Введение

В процессе автоматизированного проектирования элементов машиностроительного оборудования возникают задачи обеспечения достоверности расчетных схем, применяемых для исследования напряженно-деформированного состояния различных изделий. Применение расчетных схем в методе конечных элементов требует в качестве исходных данных знания параметров конечно-элементной разбивки исследуемых объектов, граничных условий и нагрузок. Точность исходных данных обеспечивает высокую точность численных результатов. В последующем при использовании данных моделей в специализированных интегрированных системах автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем обеспечивается и точность исследований, и высокие жесткостные характеристики проектируемых изделий.

Существующие в настоящее время численные методы исследования напряженно-деформированного состояния, среди которых лидирующее положение занимает метод конечных элементов (МКЭ),

не обеспечивают только за счет внутренних средств контроль точности результатов моделирования по сравнению с поведением реальных объектов. *Актуальной* становится задача обеспечения достоверности используемых расчетных схем при численном исследовании элементов сложных механических систем. *В работе предлагается* расчетно-экспериментальный метод исследований, при использовании которого в качестве основного результата выступают достоверные и точные расчетные модели исследуемых объектов, в частности, элементов горно-шахтного оборудования (ГШО), основанный на соединении возможностей МКЭ и метода спекл-голографической интерферометрии [1 – 7].

### 1. Постановка задачи синтеза расчетных моделей на базе метода конечных элементов и метода спекл-голографической интерферометрии

Задачу исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем, в том числе элементов ГШО, можно

рассмотреть таким образом. Пусть  $R$  – реальный объект, поведение которого формально описывается при помощи в общем случае неизвестного оператора  $L_R$ :

$$L_R(u_R, P_R, f, t) = 0, \quad (1)$$

где  $u_R, P_R, f, t$  – переменные состояния, параметры, внешняя нагрузка и время соответственно.

Математическую модель  $M$ , получаемую в результате процесса идеализации  $I$ , описывает известный оператор  $L_M$ :

$$L_M(u_M, P_M, f, t) = 0, \quad (2)$$

где в скобках – переменные состояния, параметры, внешняя нагрузка и время соответственно.

Численную модель  $N$ , получаемую в результате процесса дискретизации  $D$ , описывает в каждом конкретном случае оператор  $L_N$ :

$$L_N(u_N, P_N, f, t) = 0. \quad (3)$$

Индексы в данном выражении соответствуют некоторой создаваемой численной модели исследуемого объекта и явления.

Численная модель подразумевает совокупность собственно дискретизированных уравнений, численных методов их решения, алгоритмов и программного обеспечения.

Если объект или его физическая модель (при физическом моделировании  $F$ ) подвергаются экспериментальному исследованию, то сам объект или его модель, метод исследований, измерительные схемы (регистрация, усиление, расшифровка, представление) и измерительная аппаратура образуют экспериментальную модель  $E$ , поведение которой в операторном виде можно записать следующим образом:

$$L_E(u_E, P_E, f, t) = 0. \quad (4)$$

Соотношения (1) – (4) описывают различные формы реального объекта и исследуемого явления (на рис. 1 приведена схема исследования). В схеме процесс сравнения данных численных и экспериментальных исследований обозначен как  $C$ . Ставится задача разработки математического аппарата для расчетно-экспериментального исследования напря-

женно-деформированного состояния элементов ГШО в автоматизированном режиме.

## 2. Формализация задачи

При выборе метода для расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния элементов ГШО в автоматизированном режиме предпочтение было отдано методу спекл-голографической интерферометрии (МСГИ), который является одним из наиболее точных и информативных методов исследований [1–8]. Как показывает практика, именно этап сравнения результатов численных и экспериментальных результатов, причем в автоматизированном режиме, разработан недостаточно: нет отработанных механизмов **сравнения полей**  $u_R, u_M, u_N, u_E$ ; не производится **верификация** модели в части достоверности параметров  $P, f$ ; не определяется **полнота** модели (полнота множества  $P, f$ ); не проводится **рационализация** моделей (определение значимых факторов).

Исходя из предположений, что этап  $I$  – достаточно корректен; этап  $D$  – в принципе отработанный в литературе; этап  $F$  – при использовании МСГИ достаточно точен; требование соответствия результатов исследований  $R, M, N, E$  предполагает соответствие результатов в звене  $C$  (рис. 1).

В реальных случаях в силу того, что этап  $I$  – недостаточно “полный”, подробный; на этапе  $F$  присутствуют погрешности физического моделирования, измерений, расшифровки; на этапе  $D$  нельзя избежать погрешностей дискретизации (размеры и расположение сетки конечных элементов, типы КЭ, методы решения систем уравнений), возникает несоответствие в конкретной цепочке  $C$ .

Поскольку в схеме на рис. 1 этап  $I$  – это аппарат механики деформированного твердого тела, достаточно разработанный для большей части спектра возникающих задач моделирования реакции сложных механических систем на различные типы воздействий; этап  $M$  – метод спекл-голографической ин-



Рис.1. Общая схема соотношения этапов исследования элементов горно-шахтного оборудования:  $R$  – реальный объект;  $M$  – математическая модель;  $N$  – численная модель;  $E$  – экспериментальная модель;  $F$  – физическое моделирование;  $I$  – идеализация;  $D$  – дискретизация;  $C$  – сравнение

терферометрии, который дает интегральную точность измерения до долей микрона, в т.ч. на *реальном* объекте; этап  $D$  – МКЭ, который в *принципе* дает достаточно точное и полное описание любой сложности математической модели процесса в механических системах, то на первый взгляд ошибки в цепочках этапов  $I$ – $M$ – $D$  должны быть сведены (в принципе) к минимуму. Однако при этом узким местом является *обоснованный выбор* на различных этапах следующего:

- этап  $D$ : *задание параметров дискретизации* (т.е. например, поиск минимально необходимой сетки, описывающей адекватный процесс в математической модели (сгущение и сравнение поведения решения при этом не всегда оправданно, так как применяемые конечные элементы, например, не дают возможности в полной мере описать тот или иной процесс));
- этап  $I$ : *определение значимых параметров* (в случае очень большого количества параметров  $P$  возникает вопрос их минимизации, т.е. поиска необходимого (или оптимального, или рекомендуемого) набора параметров);
- этапы  $I$ ,  $D$ : *степени полноты множества* (существенные параметры в модели могут быть проигнорированы (например: модель строится на основе Shell-элементов, а требуется - Solid; в модели использовано жесткое защемление, а требуется – упругое); отсюда возникает необходимость обоснованного *пополнения* набора параметров модели).

Сведя к минимуму погрешности в цепочке этапа  $F$  (физическое моделирование и измерение), а также

обоснованно допустив возможность добиться структурного и параметрического изменения математической и численной модели таким образом, чтобы обеспечить адекватное описание  $R$ , исходную задачу можно представить в виде определения такой рациональной структуры и множества параметров значений  $P_N$ , чтобы с заданной точностью описать поведение реального объекта:

$$P_N^*, f_N^* : I(u_N - u_E) \leq \varepsilon, \quad (5)$$

где  $I$  – некоторая мера, определяющая несоответствие результатов экспериментальных и численных исследований ( $\Delta u_{NE} = u_N - u_E$ ).

### 3. Этапы решения задачи

При решении задачи на основе предложенного подхода можно выделить следующие типы задач:

- 1) определение типа численных моделей и (или) характеристик конечно-элементных разбивок;
- 2) определение величины, структуры, типов и (или) закона распределения нагрузок на элементы ГШО;
- 3) определение граничных условий и условий сопряжения;
- 4) определение свойств материалов;
- 5) определение значимых параметров моделей;
- 6) определение полноты множества значимых параметров;
- 7) определение минимального полного множества параметров;
- 8) определение границ применимости моделей;
- 9) определение чувствительности моделей к изменению параметров;

10) определение зависимости характеристик модели (например, прочностных и жесткостных) от конструктивных или иных параметров модели во всем или в выделенном диапазоне изменения;

11) построение “экспресс-моделей” (обоснованно структурно упрощенных на основе многовариантных исследований) и “экспресс-систем” оценки прочностных и жесткостных характеристик ГШО (аналитических зависимостей, графиков, таблиц, программных модулей или баз данных), в том числе для семейства объектов.

### Заклучение

Разработана технология расчетно-экспериментального исследования элементов машиностроительных деталей, для которой характерны следующие особенности.

1. Предложенный расчетно-экспериментальный метод дает возможность организовывать самокорректирующийся процесс расчетно-экспериментальных исследований, основным результатом которого является достоверная расчетная параметрическая модель элементов ГШО.

2. Предложенный расчетно-экспериментальный метод устраняет противоречие, следующее из линейного характера процесса исследований в традиционной их постановке.

3. Разработанная технология расчетно-экспериментальных исследований встраивается в цикл проектирования, исследования, технологической подготовки производства и изготовления ГШО на ответственных предприятиях.

4. Предложена схема определения значимых факторов расчетных моделей элементов ГШО по результатам экспериментальных исследований. Для изучения влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров на напряженно-деформированное состояние наиболее нагруженных и ответственных деталей ГШО (рам привода, скребков, узлов конвейера и др.) предлагается производить комплекс экспериментальных исследований, в которых при варьировании условий опреде-

ляется реакция исследуемого объекта. При этом представляется возможным построение сбалансированных расчетных моделей элементов механических систем с необходимым уровнем детализации. Предложена схема интенсификации процесса построения расчетных моделей ГШО на этапе экспериментальных исследований.

### Литература

1. Ткачук Н.А. Методы исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем // Динамика и прочность машин. – Х.: ХГПУ. – 1997. – Вып. 55. – С. 194 – 204.

2. Ткачук Н.А. Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем // Динамика и прочность машин – Х.: ХГПУ. – 1998. – Вып. 56. – С. 175 – 181.

3. Ткачук Н.А. Экспериментальное определение параметров конечно-элементных моделей // Механіка та машинобудування. – 1998. – № 1. – С. 68 – 75.

4. Капустин А.А., Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем // Вестник ХГПУ. – Х.: ХГПУ. – 1999. – Вып. 53. – С. 148 – 155.

5. Ткачук Н.А. Экспериментальное определение характера граничных условий в сложных механических системах // Механіка та машинобудування. – 2000. – № 1. – С. 28 – 34.

6. Гриценко Г.Д., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальные параметрические модели для исследования напряженно-деформированного состояния элементов механических систем // Вестник ХГПУ. – Х.: ХГПУ. – 2000. – Вып. 101. – С. 78 – 85.

7. Ткачук Н.А. Комплексное экспериментальное определение параметров численных моделей элементов механических систем // Механіка та машинобудування. – 2001. – № 1, 2. – С. 65 – 69.

*Поступила в редакцию 01.02.2005*

**Рецензент:** канд. техн. наук, доцент Д.О. Волонцевич, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.