

го результата выступают достоверные и точные расчетные модели исследуемых объектов, получаемые соединением в едином процессе численных и экспериментальных исследований их напряженно-деформированного состояния.

**1. Постановка задачи синтеза расчетных моделей при расчетно-экспериментальном исследовании.** Задачу исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем можно рассмотреть таким образом. Пусть  $\mathbf{R}$  – 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  $\mathbf{M}$ , 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  $\mathbf{N}$ , 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  $N$  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  $\mathbf{F}$ ) подвергаются экспериментальному исследованию, то сам объект или его модель, метод исследований, измерительные схемы (регистрация, усиление, расшифровка, представление) и измерительная аппаратура образуют экспериментальную модель  $\mathbf{E}$ , 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 на рис. 1 процесс сравнения данных численных и экспериментальных иссле-

дований обозначен через  $C$ .

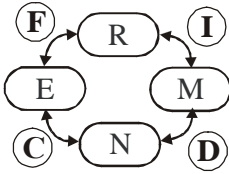


Рис. 1. Общая схема соотношения этапов исследования сложных механических систем:  
 $R$  – реальный объект;  $M$  – математическая модель;  
 $N$  – численная модель;  $E$  – экспериментальная модель;  $F$  – физическое моделирование;  
 $I$  – идеализация;  $D$  – дискретизация;  
 $C$  – сопоставление

Ставится задача разработки математического аппарата для расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем в автоматизированном режиме.

**2. Формализация задачи.** При выборе экспериментального метода для расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем предпочтение отдается методам, которые позволяют зафиксировать наиболее значимые стороны исследуемого процесса или явления с высокой точностью. Исходя из того, что в процессе идеализации модели и создания ее численной модели вносятся различного вида погрешности, можно обоснованно предположить, что эти погрешности скажутся на соответствии результатов численных расчетов и экспериментальных измерений компонент напряженно-деформированного состояния. В связи с этим выделяются следующие типы задач для *обоснованного* выбора:

- на этапе **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));

- на этапе **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);

- на этапах **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 ( $\Delta u_{NE} = u_N - u_E$ ).

При этом 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 механических систем;
- 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.

**3. Обобщение исходной постановки при разработке расчетно-экспериментального метода исследований элементов сложных механических систем.** Исходная постановка задачи по сравнению с соотношениями (5) может быть расширена. В частности, возможны следующие обобщения предлагаемого подхода.

*Для классов конструкций или для множеств моделей* при исследовании напряженно-деформированного состояния элементов механических систем во многих случаях возникает проблема оценки достоверности результатов, получаемых при численном моделировании реакции исследуемых систем на различные виды воздействий. Чаще всего эта проблема разрешается сравнением полученных результатов с данными, полученными другим способом (численно, аналитически, экспериментально). Естественно, что данные, полученные в ходе экспериментальных исследований (при соблюдении определенных требований к условиям их проведения, а также характеристикам используемой регистрирующей и измерительной аппаратуры) представляют особый интерес, поскольку при этом могут проявиться такие свойства объекта, которые учитываются исходной математической моделью или не в полной мере, или вообще ею не учитываются. Анализ результатов экспериментальных исследований может также заставить изменить используемые при исследовании численные модели (например, при использовании метода конечных элементов – типы применяемых конечных элементов, их размеры, расположение зон сгущения-разрежения конечно-элементных сеток). Существенными являются и следующие факторы: характер зависимости напряженно-деформированного состояния от времени, степень влияния на него

условий контактного сопряжения, параметров окружающей среды и т.д.

В связи с этим большое развитие в последнее время получили методы исследований прочностных и жесткостных характеристик элементов механических систем, сочетающие численные и экспериментальные этапы. Традиционный подход к расчетно-экспериментальным исследованиям (рис. 2) направленный на исследование конкретного объекта, параметра, эффекта, предполагает сопоставление результатов исследований “по горизонтали”, т.е. полученных для одного объекта каким-либо из численных методов (или несколькими) и каким-либо из экспериментальных методов (или несколькими).

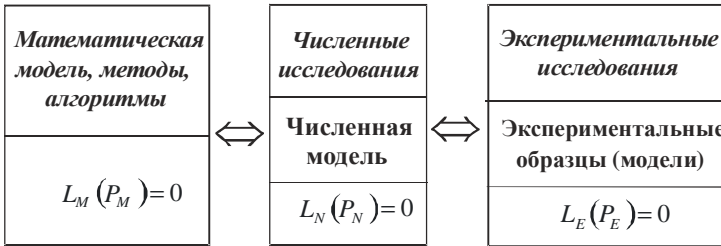


Рис. 2. Традиционная схема расчетно-экспериментальных исследований

Данный подход эффективен во многих случаях, когда поведение исследуемого объекта достаточно полно описывается одним или небольшим количеством определяющих параметров. Однако при исследовании реальных механических систем в большинстве случаев имеет место ситуация, когда в исследуемом объекте нельзя заранее выделить эти определяющие параметры. Машина или механизм, состоящие из единиц, десятков и сотен основных элементов, находящихся в десятках, сотнях и тысячах взаимосвязей между собой и с внешней средой, описываются достаточно сложной математической моделью.

При использовании традиционной схемы происходит сопоставление как параметров  $P_M, P_N, P_E$ , так и зависимостей между ними, описываемых  $L_M, L_N, L_E$ , и последующая корректировка моделей до получения удовлетворительного соответствия. Одновременно может производиться как обособленное расширение, так и сужение набора определяющих параметров, усложнение или упрощение зависимостей между ними.

Предлагается новая схема организации исследований, в которой можно устанавливать взаимосвязь не только между параметрами  $P_M, P_N, P_E$  и операторами  $L_M, L_N, L_E$ , а и между множествами тех и других (рис. 3). Это позволяет использовать при организации баз данных, содержащих результаты численных и экспериментальных исследований, описывающих различные механические системы, проводимые в различное время различными исследователями с применением различной аппаратуры, различных численных мето-

дов, различных вычислительных методов и средств для установления искомым зависимостей. Более того, избыточность информации (которая имеет место в некоторых случаях) на самом деле не приводит к противоречиям, а служит дополнительным источником повышения достоверности результатов, степени адекватности моделей и точности методов. Причем сопоставление результатов можно производить как между элементами множеств  $M$ ,  $N$  и  $E$  (математические модели, результаты численных и экспериментальных исследований соответственно), так и внутри множеств, используя при этом различные весовые коэффициенты для выделения результатов более значимых исследований.

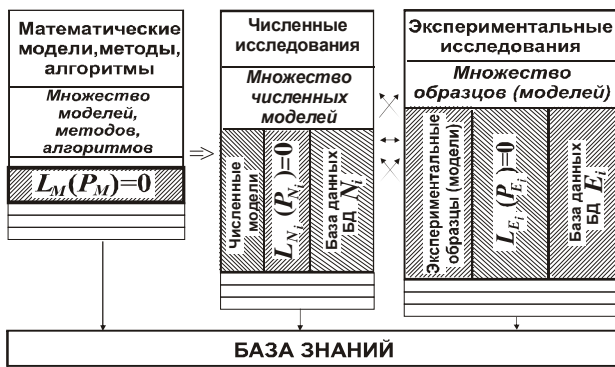


Рис. 3. Предлагаемая схема расчетно-экспериментальных исследований

Получаемая в результате база знаний за счет постоянного пополнения множеств  $M$ ,  $N$  и  $E$  не только растет в объеме, но и повышает достоверность содержащихся в ней элементов знаний.

Естественно, что предложенная схема нуждается в определенной формализации. Отдельной крупной задачей является организация, создание и сопровождение баз данных хотя бы по отдельным классам объектов, по тем или иным областям. Кроме этого, еще одной важной проблемой является выбор критериев сопоставимости различных элементов различных множеств. Более того, в большом количестве случаев могут выявиться противоречия между сопоставляемыми данными, причем они могут на первый взгляд просто взаимно исключать друг друга. Однако такое состояние предлагаемой схемы соответствует в общих чертах состоянию знаний во многих отраслях науки и техники. Это нормальный процесс установления новых, уточнения и опровержения старых представлений о поведении объекта (машин, узлов, механизмов, агрегатов и т.д.). В практике проектировщиков нередки случаи, когда конструкторы, исследователи с большим опытом работы по памяти устанавливают аналогии между элементами нового проекта, находящегося в разработке, с элементами своих или чужих проектов, выполненных гораздо раньше. Это находит в последующем подтверждение при сопоставлении мо-

делей и результатов. Таким образом, предлагаемый подход является в некоторой степени схемой, действующей в практике проектирования: накопление данных, выявление аналогий и установление зависимостей.

Естественно, что данный подход требует особой организации соответствующих баз данных, поскольку количество учитываемых факторов, параметров, воздействий и взаимосвязей в механических системах чрезвычайно велико, даже если ограничиться отдельным классом объектов. Лавинообразного роста информации можно избежать, используя иерархические структуры ее хранения, основанные на различных типах классификаций исследуемых объектов: по форме, по составу, по типам внешних воздействий, по функциональному назначению и т.д. При этом можно устанавливать различные виды соответствия: внутри определенного класса, подкласса, подподкласса, а также между элементами разных классов, подклассов, подподклассов и т.д.

Формализация предложенного подхода может быть следующей. Пусть множество  $R$  – объединение элементов  $\bar{R}^i$ . Тогда множество параметров  $\bar{P} = \bigcup P_i$ , т.е. множество параметров  $\bar{P}$  является объединением множеств отдельных параметров отдельных представителей класса (для каждой из типов моделей  $R, N, M, E$ ), и задача (5) записывается в виде:

$$\bar{P}_N^* : I(\bar{P}, \bar{P}_N, \Delta u_{NE}) \leq \varepsilon. \quad (6)$$

*Для расширенного множества параметров*, исходя из идеи о формальной равноправности параметров  $P_E, P_N, P_M$ , можно формировать *расширенное обобщенное параметрическое пространство*, из которого можно выделять подпространства *варьируемых параметров, уточняемых параметров, критериальных параметров, ограничительных параметров*. При этом в процессе исследований все эти категории могут быть пересекающимися, перетекующими друг в друга. Тогда задача (5) записывается в виде:

$$\bar{P}_V^* : I(\bar{P}, \bar{P}_V, \Delta u_{NE}) \leq \varepsilon, \quad (7)$$

где  $\bar{P}_V$  - множество варьируемых параметров.

*На случай динамического процесса* обобщение задачи на динамический процесс

$$P_N^*, f^* : I(t) \leq \varepsilon \quad (8)$$

предполагает формирование критерия, позволяющего распространить функционал на некоторый характерный интервал времени.

*На случай нелинейного процесса* справедлива формулировка

$$P_N^*, \tau^* : I(\tau) \leq \varepsilon, \quad (9)$$

где  $\tau$  – множество параметров, описывающих нелинейный процесс (например, параметры нагружения при упруго-пластическом деформировании).

**На случай резко возрастающих требований к вычислительным ресурсам** возникает проблема, если требование увеличения точности вступает в противоречие с существующими в распоряжении исследователя вычислительными ресурсами  $R_S$  (выступает в качестве штрафа: величина его резко возрастает при приближении к ограничению на имеющиеся ресурсы):

$$P_N^*, f^* : I(P_N, f) + R_S(P_N, f) \leq \varepsilon. \quad (10)$$

**На случай сравнения состояний объекта через большие промежутки времени** можно использовать идею *хронологического “портретирования”* (т.е. серия “снимков” объекта через большие промежутки времени, а отсюда – определение или изменения самого объекта, или физико-механических характеристик материала). Происходит как бы “привязка” “ромба” (см. рис. 1) предлагаемого РЭМ к разделенным моментам времени. В данном случае

$$P_N^*, f^* : I(t_1, t_2, \dots, t_n) \leq \varepsilon, \quad (11)$$

где  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – моменты времени, при которых производится сравнение состояний объекта.

**Для интенсификации процесса расчетно-экспериментальных исследований** при построении расчетных моделей элементов современных машиностроительных конструкций необходимо использовать сбалансированные расчетные модели, которые характеризуются следующими особенностями: учетом всех значимых факторов; отсутствием избыточности; прогнозом чувствительности модели к изменению различных параметров.

Поскольку современные изделия характеризуются сложностью конструкции, а также условий нагружения и сопряжения его элементов, и при этом широким разнообразием вариантов исполнения и эксплуатационных режимов, то удовлетворение требований к точности, надежности и минимальной материалоемкости предполагает проведение комплекса их экспериментальных и теоретических исследований. По традиционной схеме исследований на это требуется значительное время, что сдерживает сроки проектирования и технологической подготовки производства. Предлагается интенсивная схема исследований (ИСИ) элементов сложных механических систем, включающая следующие этапы:

- проведение анализа целого класса конструкций;
- определение типовой для той или иной группы конструкций;
- проведение исследований выбранной конструкции с варьированием всех факторов;
- построение ряда расчетных моделей после анализа результатов исследования типовой конструкции.

При обоснованном использовании данного подхода получается многократная экономия времени, средств, ресурсов оборудования без ущерба для достоверности.

*Для формирования баз данных, знаний и экспертных систем на основе расчетно-экспериментальных исследований* во многих случаях самостоятельную ценность имеют не только и не столько экспериментально полученные 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 независимо из различных источников и в разное время.

Окончательным результатом исследования является достоверная численная модель для определения напряженно-деформированного состояния тех или иных объектов или классов объектов.

При решении поставленной задачи при помощи предложенного расчетно-экспериментального метода 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 (*узкая задача*); определить в пространстве варьируемых параметров области, в пределах которых справедливы различные модели (*широкая задача*).

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 напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем 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 над процессом. Это обусловлено, во-первых, невозможностью на данном этапе пол-



ной формализации предлагаемой технологии исследований, во-вторых, необходимостью исключения тупиковых ситуаций и, в-третьих, очень высокой стоимостью ошибки (например, 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 возможном объеме.

Используя преимущества INTERNET-технологий, исследования с применением предложенного расчетно-экспериментального метода 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 исследуемой механической системы.

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 напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем, а именно формализовать процесс сравнения, автоматизировать процесс улучшения численной модели и повысить оперативность всего цикла исследований с привлечением современных информационных технологий, что дает возможность провести географическое и временное разделение процесса исследований.

***Многошаговое уточнение параметров расчетных моделей элементов механических систем.*** Процесс исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов современных машиностроительных конструкций характеризуется следующими особенностями: быстрая сменяемость изделий; предельно сжатые сроки проектирования и необхо-

димось дальнейшего уменьшения сроков, отведенных для расчетов и испытаний изделий, подготовки производства, а также необходимость снижения стоимости данных этапов; высокие требования к техническим характеристикам изделий и к экологической безопасности их эксплуатации; наличие достаточного числа мощных универсальных CAD/CAM/CAE-систем, которые автоматизируют большую часть этапов конструирования, исследований и технологической подготовки производства; высокая стоимость и большая длительность экспериментальных исследований; сложность формы, а также условий эксплуатации проектируемых машин; наличие большого количества разъемных и неразъемных соединений; необходимость учета явлений предварительного натяга, наличия микроразрывов, остаточных напряжений, односторонних ограничений в зонах контакта; неоднородность, анизотропность материала; уникальность некоторых объектов и недостаток в этой связи данных по исследованиям аналогичных конструкций.

Указанные обстоятельства предполагают необходимость во многих случаях производить в сжатые сроки и теоретических, и экспериментальных исследований элементов вновь проектируемых машин. Целый ряд конструкций при этом естественным образом вписывается в интенсивную схему расчетно-экспериментальных исследований. Однако дальнейшее ужесточение требований к достоверности результатов исследований требует создания расчетно-экспериментальных методов исследований, которые позволяют учитывать индивидуальные особенности исследуемых конструкций. Это возможно только в том случае, когда процессы теоретических и экспериментальных исследований: параллельны во времени; взаимосвязаны по данным; взаимно интегрированы; согласованы по используемым подходам; взаимно корректируемые по моделям.

Предлагается многошаговая схема расчетно-экспериментальных исследований элементов механических систем, которая предполагает следующие этапы.

1. Создание пробной расчетной модели объекта (*модель первого уровня*) с использованием специализированной или универсальной системы автоматизированного проектирования
2. Проведение численного исследования объекта
3. Проведение экспериментального исследования объекта. Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований и определение значимых факторов модели
4. Корректировка структуры и параметров расчетных моделей объекта (*модель второго уровня*)
5. Проведение повторного численного исследования объекта
6. Корректировка расчетной *модели третьего уровня*
7. Проведение численных исследований объекта с различным набором конструктивных и эксплуатационных параметров. Расчет значений параметров, обеспечивающие необходимый уровень прочности, жесткости, вибраций и т.д.

## 8. Корректировка исходной модели в САПР.

Одна из основных идей метода заключается в создании единой базы данных, в которую записываются в согласованной форме результаты численных и экспериментальных исследований, проводимых параллельно. Полученные расчетным и экспериментальным путем распределения искомым величин должны быть численно сопоставлены. В качестве критериев соответствия в некоторых случаях предлагается вычисление коэффициентов

$$k_B = \frac{\|u_E\|}{\|u_N\|}; \quad k_\phi = \frac{\|u_E - k_B u_N\|}{\|u_E\|}, \quad (12)$$

где  $u_E$ ,  $u_N$  – поля измеряемых величин (перемещения, напряжения, деформации), полученные соответственно экспериментальным и численным путями;

$\|\cdot\|$  – некоторая норма;

$k_B$ ,  $k_\phi$  – коэффициенты соответствия величин и форм распределения.

Первый из коэффициентов описывает для многих случаев степень несоответствия характеристик материала (могут не соответствовать принятые расчетные и реальные для материала модели или самого объекта), применяемых гипотез (несоответствие расчетных и фактических моментов раскрытия стыков, величин предварительных натягов, а также дефекты материала или дефекты технологической операции), параметров конечно-элементной модели (неудачный выбор типов применяемых элементов, вида и густоты конечно-элементной сетки) и т.д. При этом необходимо заранее определять предельно допустимое значение  $k_B$  (в идеальном случае  $k_B=1$ , и чем больше он отличается от 1, тем хуже соответствие). Коэффициент  $k_\phi$  в идеальном случае равен 0, а причины отклонения от идеального случая – те же, что и для  $k_B$ . Отличительной особенностью данного коэффициента является то, что в некоторых случаях он не может быть уменьшен ниже некоторой предельной величины  $k_\phi^{np}$  вследствие того, что расчетная модель несет в себе неустранимые погрешности. В этом случае (если порог  $k_\phi^{np}$  неприемлемо высок) необходимо произвести корректировку исходной расчетной модели.

Область применения предложенного метода охватывает самые широкие классы исследуемых конструкций, виды решаемых задач и типы анализируемых процессов.

С учетом ограничений на варьируемые параметры  $P$  в реальных ситуациях, в предположении адекватной математической модели, минимизации различного вида погрешностей (измерения, округления, расшифровки), ос-

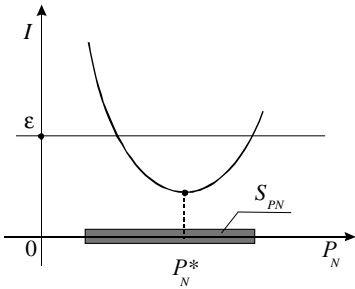
новную идею предполагаемого расчетно-экспериментального метода можно представить в виде задачи:

$$P_N^* : I(P_N) \rightarrow \min \text{ на } S_{PN}, \quad (13)$$

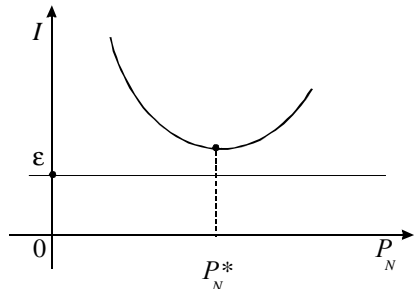
где  $S_{PN}$  – область варьирования  $P_N$ .

Возможные варианты решения задачи:

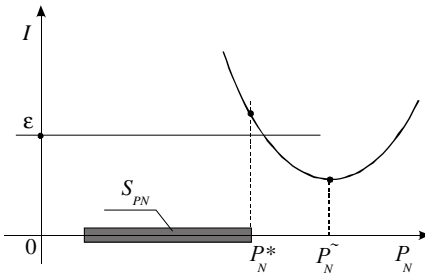
1.  $I(P_N^*) \leq \epsilon$  – полученная расчетная модель признается удовлетворяющей критерию точности (рис. 4, а), а множество параметров – требованию полноты.



а



б



в

Рис. 4. К вопросу минимизации функционала несоответствия

2.  $I(P_N^*) \geq \epsilon$ , и не существует в пространстве параметров  $P_N$  такой точки, что  $I(P) \leq \epsilon$ . Тогда пространство параметров неполное, и необходимо добавлять параметры в структуру модели (рис. 4, б).

3.  $I(P_N^*) \geq \epsilon$ , но существует в пространстве параметров  $P_N$  точка или область, где  $I(P) \leq \epsilon$ . Отсюда – вывод о некорректных ограничениях на параметры модели (или достоверная модель лежит за пределами возможностей варьирования параметров, например, размерность задачи очень высокая) (рис. 4, в).

4. **Общая схема построения программно-аппаратного комплекса при реализации расчетно-экспериментального метода.** Основное противоречие в процессе исследований по традиционной схеме – отсутствие *взаи-*

мовления результатов теоретических и экспериментальных исследований в процессе самих исследований непосредственно, причем на базе *текущих* результатов исследований.

Основной функциональной особенностью предлагаемого подхода является механизм *обратной связи* в цепи расчет – эксперимент, обеспечивающей *параллельное* и *взаимосогласованное* (и *взаимовлияющее*) изменение плана расчетно-экспериментальных исследований в ходе *самокорректирующего* процесса.

При этом сформулированная в работе задача решается при *скользящем* изменении состава пространств значимых параметров. Результатом работы процесса (рис. 5) является достоверная конечно-элементная модель, обеспечивающая получение прочностных и жесткостных характеристик класса исследуемых конструкций с заданной точностью.

Предложенный расчетно-экспериментальный метод дает возможность создавать *самокорректирующийся* процесс уточнения параметров расчетной параметрической модели.



Рис. 5. Структурная схема системы автоматизированного расчетно-экспериментального исследования

**Заключение.** Предложена общая технология расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем, 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 исследуемого объекта.

2. Общая постановка и схема построения программно-аппаратного комплекса (ПАК) на базе расчетно-экспериментального метода и специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза предполагает в своей реализации решение следующих задач:

- определение структуры ПАК;
- организация информационных потоков;
- разработку конкретной структуры программно-аппаратного реализа-

ции предложенных подходов;

- численную реализацию прочих подходов

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

4. Разработанная технология расчетно-экспериментальных исследований встраивается в цикл проектирования, исследования, технологической подготовки производства и изготовления сложных машиностроительных конструкций.

б. Предложена схема определения значимых факторов расчетных моделей элементов сложных механических систем по результатам экспериментальных исследований.

По результатам опыта использования предложенного метода в условиях исследования реальных конструкций можно заключить:

1. Метод обеспечивает высокую эффективность, оперативность, достоверность, точность и низкую стоимость исследований.

2. Результатом применения метода (или его частичной схемы) могут быть или согласованные распределения искомым перемещений, напряжений, деформаций, или согласованная расчетная модель, готовая для проведения дальнейших численных исследований.

3. Класс конструкций и явлений, на которые может быть распространен предложенный метод исследований, достаточно широк, а сам метод достаточно гибок и легко модифицируем.

Это дает основание утверждать, что применение предложенного подхода приводит к многократному сокращению сроков, стоимости исследований, дает сбалансированную модель для анализа и оптимизации проектируемых конструкций.

В дальнейшем разработанный подход предлагается реализовать в виде специализированного программно-аппаратного комплекса (ПАК), что предполагает в своей реализации решение следующих задач: определение структуры ПАК, разработку конкретной структуры программно-аппаратной реализации предложенных подходов и их материальную реализацию.

**Список литературы:** 1. *Зенкевич О.К.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 2. *Стренг Э., Фикс Дж.* Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 349 с. 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., 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. 5. *Ткачук Н.А.* Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем // Сб. научн. тр. “Динамика и прочность машин”. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – вып.56. – С.175-181.

*Поступила в редколлегию 19.11.2005*

**ГРУНАУЭР А. А.**, д.т.н., проф., заведовал кафедрой ТММ ХПИ с 1968 по 1991 год

## **ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН: НАУКА И ЛЮДИ. ВОСПОМИНАНИЯ И РАЗДУМЬЯ**

Мое первое знакомство с кафедрой теории механизмов и машин ХММИ ХПИ состоялось весеннем семестре 1940-1941 учебного года. Правильнее, наверное, сказать, что в предвоенном семестре 1940-1941 учебного года.

Кафедрой тогда заведовал проф. Я. М. Майер. Он же читал лекции нашему потоку. К этому времени под его руководством был создан и в дальнейшем запущен в производство двигатель В-2, ставший сердцем непревзойденной тридцатьчетверки. По понятным причинам, я узнал об этом значительно позже.

Более раннюю историю кафедры я знаю мало. Помню только, что до 1940 года кафедрой заведовал проф. И.Е. Любарский, о научных интересах которого я узнал из специального номера институтской многотиражки “За кадры”, выпущенного к 55-летию юбилею института. В этом номере был помещен дружеский шарж на многих преподавателей. В частности, профессору Любарскому были посвящены следующие строки:

“...но, говорят, в его труде о механизмах планетарных  
есть пункт один весьма забавный – двухсотпроцентный КПД...”

Так весьма забавно отреагировал студенческий поэт на действительно забавное свойство планетарных механизмов: при некоторых значениях передаточного отношения они могут иметь КПД выше, чем КПД соответствующего обращенного механизма, но, конечно же, не выше 100%. После сдачи зачета по ТММ за 4-й семестр и остальных полагававшихся экзаменов мне, как и многим студентам, пришлось отложить учебу на время войны.

Когда в 1945 году я продолжил изучение курса ТММ, кафедрой заведовал доц. Ю.В.Эпштейн, человек очень эрудированный и энергичный. Именно благодаря этим качествам в ХММИ была восстановлена и значительно расширена учебная лаборатория, создан кабинет курсового проектирования, оборудованный чертежными комбайнами, создана база для проведения научных экспериментов.

Очень большое внимание уделялось на кафедре изучению и освоению сотрудниками новых для того времени методов измерения и регистрации неэлектрических величин электрическими методами, разработке оригинальных датчиков – преобразователей. Лабораторные работы, выполнявшиеся на кафедре, были связаны с основными разделами курса. Проектировал и “пробивал” их изготовление на опытном заводе ХПИ инженер кафедры, опытный конструктор, А. Д. Мукоед. Выполнены они были настолько удачно, что некоторые из них начали выпускаться МВО СССР. К сожалению,

которые из них начали выпускаться МВО СССР. К сожалению, модель для демонстрации различных схем уравнивания главного вектора сил инерции кривошипно-ползунного механизма осталась уникальным экспонатом только в ХПИ.

Еще в предвоенные годы на небосводе ТММ начала восходить звезда первой величины И. И. Артоболевский, который в 1946 году был избран действительным членом АН СССР. Именно Артоболевский извлек из забвения работы Л. В. Ассура по структуре, кинематике и кинетостатике плоских механизмов и коренным образом изменил изложение этого раздела курса ТММ в своем классическом учебнике издания 1940 г. Например, решение задач исследования механизмов с четырехзвенными группами изложено здесь с использованием “особых точек Ассура”. Эта же задача в учебнике Х. Ф. Кетова и Н. И. Колчина издания 1939 года решается значительно более сложным методом “ложных положений”.

Долголетняя работа по использованию и развитию основополагающих для ТММ идей Л. В. Ассура получила завершение в 1991 году, когда в официальную терминологию был внесен термин “группа Ассура”.

Однако вернемся в ХММИ. Ю.В.Эпштейн был горячим сторонником использования идей Л. В. Ассура, которые послужили базой для разработки общих методов исследования плоских механизмов. На основе этих методов и читался в ХММИ, а затем в ХПИ, курс ТММ. Естественно, что за истекшие полвека появились новые технические возможности, и инженер сменил логарифмическую линейку на персональный компьютер, но общий подход к решению задачи сохранился.

Бурное развитие вычислительной техники, начиная с 70-х годов прошлого века (подумать страшно, какими единицами измерения приходится пользоваться), позволило заменить графические методы решения многих задач ТММ аналитическими, для чего потребовалось разработать доступные для инженера-механика алгоритмы и показать возможность их реализации на имеющихся ЭВМ.

Например, для решения упоминавшихся выше задач кинематики плоских механизмов удобным оказался метод проектирования планов скоростей и ускорений на координатные оси. Его применение для механизмов с двухзвенными группами Ассура было опубликовано еще в 1980 году. Этот метод вызвал большой интерес работников кафедр ТММ Советского Союза, и для его распространения была использована существовавшая тогда система приглашения специалистов в ВУЗы страны. В течение 1981-1993 г. г. я побывал в 13 городах в пределах от Владивостока до Львова и от Ижевска до Алматы, где читал лекции преподавателям и студентам.

В эти годы компьютеры на кафедрах ТММ были редкостью и, чтобы обеспечить решение студентами хотя бы простых задач, были разработаны программы для микрокалькуляторов, разрабатывались также программы и для ПК на языках Бейсик и Паскаль.

Завершением работ в этом направлении было обобщение метода “проект-



тирования планов” на группы Ассура с числом звеньев более двух. Эти результаты были доложены мной в 1995 г. на 9-м Всемирном конгрессе в Милане, опубликованы в журнале и использованы на кафедре Технического Университета Кайзерслаутерн для решения задачи кинематики робота типа “паук”.

Значительным успехом кафедры следует считать разработку метода исследования установившегося движения машинного агрегата с учетом механической характеристики электродвигателя, связывающего таким образом расчеты “механических” и “электрических” процессов.

Во всех учебниках ТММ, изданных до 1994 г., при изложении этого раздела делается необоснованное допущение о постоянстве момента двигателя, которое приводит к значительной погрешности результатов расчета. Впервые на необходимость учитывать зависимость момента электродвигателя от скорости вращения его вала указал М. А. Скуридин. Однако сложность полученных им формул затрудняла его практическое применение. Доц. В. П. Изюмскому и ст. пр. В. П. Заблоцкому удалось найти более простое и, тем не менее, более точное решение, которое в дальнейшем успешно использовалось при чтении лекций и в курсовом проектировании.

Отмечу, что если не учитывать связи между процессами различной физической природы, имеющими место при работе сложных технических систем, можно столкнуться с качественно неожиданными и потому опасными процессами, вызывающими аварии, а подчас и катастрофы. К числу таких явлений относятся флаттер и шимми в авиации, обменные колебания при работе нескольких дизельгенераторов на общую сеть. С этой проблемой мне пришлось столкнуться чисто практически. Есть основания полагать, что Чернобыльская катастрофа является результатом вывода сложной физической системы, в которой протекают ядерные, электрические и механические процессы, на нерасчетный режим, оказавшийся неустойчивым.

В научном плане работа кафедры испытывала влияние двух крупнейших на Украине специалистов в области ТММ: проф., доктора физ.-мат. наук Я. Л. Геронимуса и чл. корр. АН УССР, проф. д.т.н. С. Н. Кожевникова.

Проф. Я. Л. Геронимус добился открытия в Харькове филиала семинара по ТММ института Машиноведения АН СССР. Заседания Семинара проходили регулярно на кафедре ТММ ХММИ, а затем и ХПИ. На них заслушивались доклады работников институтов и заводов Харькова и других городов. Руководителем семинара с момента его основания в 1944 г. до 1981 г. был проф. Я. Л. Геронимус, который отличался глубокими знаниями математики, теоретической механики и ТММ. Меня всегда поражала его способность выделить главную идею и физический смысл докладываемой работы, очистить ее от словесных и математических украшений.

Очень важным средством развития и распространения научных идей в области ТММ в пределах Украины, Союза и за рубежом была организация Республиканского межведомственного научно-технического сборника

“ТММ”, в редакционную коллегию которого входили крупнейшие в этой области знаний специалисты Украины.

Редакторами сборника с момента его основания в 1966 г. и до 1994 г. последовательно были Я. Л. Геронимус, С. Н. Кожевников и автор этих строк. Заседания редакции сборника проводились попеременно на кафедрах различных ВУЗов Украины, что позволяло расширить объем полезной информации, получаемой как “гостями” так и “хозяевами”. Работа в редакции сборника позволила мне познакомиться с характером “инженерного мышления” С. Н. Кожевникова, который блестяще доводил свои теоретические выкладки до прикладных решений, включающих конструктивные, эксплуатационные и технологические, а подчас и монтажные требования к машине. Все это было возможно благодаря сочетанию глубокого знания математики, механики и практическому опыту как на уровне инженера, так и рабочего.

Именно работы С. Н. Кожевникова дали начальный толчок к решению задачи оптимального синтеза кулачковых механизмов. В этом случае задача содержит как вариационную для определения профиля кулачка, так и параметрическую часть, и осложняется тем, что сила сопротивления зависит от волновых гидродинамических процессов в трубопроводе между насосом и форсункой, а следовательно, и от скорости толкателя. В ходе решения должны быть учтены требования рабочего процесса дизеля, ограничения эксплуатационного, технологического и прочностного характера.

Эти работы выполнялись А. Л. Григорьевым, А. А. Зарубиной, И. М. Вештаком, С. И. Королем при участии доц. И. И. Тартаковского, ст. н. с. Р. А. Ланис и В. Н. Погарского. Они получили свое завершение в докторской диссертации А. Л. Григорьева в 2004 г.

Я хорошо запомнил высказывание Я. Л. Геронимуса, что наилучшим решением технической задачи является решение с помощью четырех действий арифметики. Мне всегда казалось, что наиболее красивым является результат научной работы, легко проверяемый “на пальцах”. Примером этому может послужить дискуссия о характере сил трения в регуляторах скорости дизелей.

К 40-м годам были известны две математические модели системы прямого регулирования, описанные Н. Е. Жуковским и И. А. Вышнеградским. Первый основывался на допущении, что в механизме регулятора действуют силы сухого трения. Второй учитывал только силы вязкого трения. Работы, выполненные в этом направлении под руководством акад. В. Н. Жолтинского, основывались на теории Н. Е. Жуковского. Отсюда вытекало, что рейка топливного насоса должна быть неподвижна, когда колебания нагрузки на двигатель не выходят за пределы “зоны застоя”.

Во всех работах ЦНИДИ использовалась теория И. А. Вышнеградского. В этом случае система регулирования линейна, и “зона застоя” в ней отсутствует.

Тщательные эксперименты, показали, что даже при постоянной нагрузке рейка совершает высокочастотные колебания. Демонстрация В.Н. Жолтинскому этого явления на стенде ЛТКД вызвала у него недоумение и сомнение в “чистоте” эксперимента. Сомнения были рассеяны, когда я, рискуя, конечно, пустить двигатель в разнос, прижал пальцем рейку к корпусу насоса и полностью погасил ее колебания, что тотчас отметил “зайчик” на экране осциллографа. Этот простейший эксперимент однозначно определил необходимость использовать для исследования систем регулирования быстроходных дизелей теорию И. А. Вышнеградского.

Еще одна исследовательская работа, в которой я принимал участие, имела не только “красивый”, но и поучительный результат. В середине 60-х годов, ХТЗ стал получать рекламации, связанные с поломками ВОМ трактора новой модели при работе с дождевальными машинами. В те годы газеты были полны статьями о поливном земледелии, и тут – на тебе, – необъяснимые поломки вала привода дождевальной машины. И, самое неприятное, что их не очень много, и закономерность их появления непонятна. Но они повторяются, и излом всегда носит четко выраженный усталостный характер. Завод обратился к ХПИ с просьбой найти причину поломок и дать рекомендации по их устранению.

Проверка заводских расчетов на усталостную выносливость показала их полную безупречность. Затем перешли к экспериментальному определению напряжений на опасном участке вала. Завод выделил для этой цели новый трактор, на кафедре тракторостроения его оборудовали необходимыми средствами измерений и стали искать опасный режим работы с дождевальной машиной. Но как мы ни старались, мы не могли найти этот режим.

После долгого и напрасного перевода осциллографической бумаги, наступил день, когда потек сальник дождевальной машины, и ее понадобилось разобрать. Естественно, что был разобран и карданный привод, соединяющий ВОМ с дождевальной машиной. После ремонта все было собрано заново, и вдруг, о радость, осциллограф показывает примерно 5-ти кратную перегрузку ВОМ моментом, изменяющимся по синусоиде с частотой, равной удвоенной частоте вращения вала. Значит перегрузка – это результат неправильной сборки карданного привода. И тут только мы обратили внимание, что его среднее звено было выполнено из двух труб квадратного сечения, вставленных одна в другую так, что они могли передавать крутящий момент и изменять расстояние между вилками кардана, закрепленными на концах этих труб, то есть работать как упрощенное шлицевое соединение. Но такая конструкция допускала два варианта сборки кардана: либо так, что вилки на среднем звене параллельны между собой, либо так, что они скрещиваются под углом 90°. Первый вариант сборки обеспечивает нормальную работу механизма, второй превращает его в генератор крутильных колебаний, которые и приводили к поломкам более слабого ведущего вала.

Поэтому выводы по всей теме содержали только одно предложение: следует заменить квадратное сечение промежуточного звена на прямоуголь-

ное, исключая возможность неправильной сборки.

Можно было бы, конечно, на упаковочных ящиках дождевальных машин писать: «ПЕРЕД СБОРКОЙ ПРОЧИТАЙ ИНСТРУКЦИЮ», но кто же такие надписи, а тем более, инструкцию, читает).

Подводя итоги, можно сказать, что у каждого в жизни свой критерий удачи. Мне кажется, удачное завершение избранной или порученной работы и есть высшая удача независимо от области деятельности и занимаемой должности.

Не меньшее удовлетворение, чем от описанных выше научных работ, я получал от обнаруженной причины аварийной остановки турбины, и от ремонта тяжелого дизеля, и от того, что удалось выручить неопытного мотоциклиста, запустив двигатель его мотоцикла или от того, что мне поручили выточить первую на заводе макетную гильзу двигателя В-2.

...Такие воспоминания и раздумья посетили меня, когда в этом году родная кафедра обратилась с просьбой поделиться ими с дорогими моему сердцу политехниками, поздравляя их со 120-летием ХПИ и 85-летием кафедры ТММ.