

УДК 539.3

Чепурной А.Д., Глинин Г.П., Литвиненко А.В., Ткачук Н.А.

ОБЩИЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТИРУЕМЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

Введение. Бурное развитие современного машиностроения происходит как в направлении роста технических и тактико-технических характеристик проектируемых и изготавливаемых машин, так и в направлении резкого сокращения сроков и стоимости проектирования и технологической подготовки производства новых изделий. Особую специфику при этом приобретают проблемы, связанные с разработкой и изготовлением элементов высокоответственных машин. Это, например, машины для работы на режимных объектах (аэродромы, АЭС, предприятия химической промышленности), машины для транспортировки опасных грузов (жидкостей, газов и т.д.). К ним предъявляются особые требования. При этом условия работы данных машин сопряжены с выполнением регламентированных операций, а выполняемые функции настолько ответственны, что требуется высокая надежность, недопущение поломок и аварий. При проектировании таких машин в силу наличия многих факторов, стохастических воздействий, нелинейностей заранее сложно предвидеть и рассчитать действующие в ходе эксплуатации нагрузки, что затрудняет расчетное обоснование параметров высокоответственных элементов машин.

Существующая в настоящее время практика проектно-исследовательских работ, основанная на широком применении CAD/CAM/CAE-технологий для обоснования конструктивных решений и параметров проектируемых машин путем численного моделирования физико-механических процессов, не обеспечивает в данном случае достоверного результата, поскольку действующие в процессе эксплуатации машины нагрузки зачастую неизвестны не только по величине, но и по составу, а также законам распределения в пространстве и во времени.

Таким образом, нечеткость задания этих важных исходных данных для численного моделирования приводит и к нечеткости решения задачи анализа, а, значит, и задач структурного и параметрического синтеза. Возникает противоречие между потребностями машиностроения, машиноведения, с одной стороны, а также теорией и практикой оптимального проектирования элементов машин, – с другой. Решение данной актуальной и важной задачи составляет цель и содержание данной статьи.

Постановка задач исследований. Рассматривается, следуя [1-3], сложная механическая система, поведение которой описывается в операторном виде следующим образом:

$$L(u, P, f, t) = 0, \quad (1)$$

где L – оператор задачи; u – переменные состояния; f – внешние воздействия; P – обобщенные параметры, однозначно описывающие проектируемую машину; t – время.

Особенностью задачи анализа (1) является то, что состав, структура, величины и распределения обобщенных параметров являются искомыми (варьируемыми на этапе синтеза), а внешние воздействия f – нечетко определенными (на этапе решения задачи анализа (1)).

Ставится задача разработки такого подхода к решению задачи синтеза, который бы, с одной стороны, давал возможность естественным образом встраивать процедуру

варьирования и направленного поиска P , а с другой – сводить к минимуму неопределенность в поиске внешних нагрузок f .

Общий подход к решению задачи. Как уже отмечалось, основным препятствием для построения адекватных и точных аналитических и численных моделей исследуемых физико-механических процессов и состояний в проектируемых высокоответственных машинах является проблема идентификации нагрузок f . Для решения этой задачи при традиционном подходе либо аналитически или численно решается некоторая вспомогательная задача, либо проводится цикл экспериментальных исследований для измерения f . Первый путь применим для простых механических систем и не гарантирует точности и адекватности вычисляемых нагрузок для сложных систем и процессов. Второй путь требует предварительного изготовления физической модели, опытного образца или макета. Это, в свою очередь, сопряжено с дополнительными затратами времени и средств.

Для устранения указанных противоречий и недостатков предполагается новый подход: эксплуатационные нагрузки определяются на основе экспериментальных исследований машин аналогичного назначения, проходящих лабораторные и полигонные испытания по той же программе, которая предусмотрена для вновь проектируемой машины; на основе данных, полученных в ходе проведенных экспериментов, определяются эксплуатационные нагрузки, прикладываемые к расчетным моделям новых машин, т.е. создается «гибридная» расчетно-экспериментальная модель; проектируемые машины оптимизируются по структурным, технологическим параметрам и эксплуатационным режимам с применением «гибридной» модели; разрабатываются рекомендации, проектно-технологическая и эксплуатационная документация; изготовленные образцы проходят ту же программу лабораторных испытаний, что и ранее специально созданные экспериментальные образцы.

Предложенный подход избавлен от присущих численно-аналитическим и расчетно-экспериментальным методам недостатков при определении внешних нагрузок. В то же время это преимущество достижимо и приносит реальный эффект в случае либо наличия машины-аналога для проведения эксперимента с целью определения внешних нагрузок на ее элементы, либо возможности его быстрого изготовления, приобретения, а также в случае возможности получения данных об испытаниях, проведенных другими исследователями. Естественным образом этот недостаток устраняется при проектировании машины, продолжающей существовать ряд машин, при модернизации существующих машин или при создании машины по имеющемуся в физическом виде прототипу. В таком случае организация более информативных экспериментальных исследований наименее затратна по времени, средствам и наиболее результативна по полноте результатов.

Формализация предложенного подхода. При использовании предложенного подхода возникают 2 важные задачи, требующие решения:

- 1) Формализация процедуры *определения внешних нагрузок f* , действующих на проектируемую машину, на текущем этапе анализа (1);
- 2) формализация этапа встраивания процедуры корректировки f и варьирования P при переходе от текущего подэтапа синтеза к следующему.

Задача 2) нашла свое решение в ряде работ, посвященных разработке и совершенствованию метода обобщенного параметрического описания сложных и сверхсложных механических систем [1-6]. Предложенный в этих работах аппарат может быть использован и для моделирования реакции машин на эксплуатационные нагрузки, если только математический аппарат, применяемый для решения задачи (1), не препятствует реализации данной технологии исследований.

Предлагается следующая формализация задачи расчетно-экспериментальной идентификации нагрузок f , действующих на проектируемую (и исследуемую) машину. Пусть

p^P – множество обобщенных параметров, которое идентифицирует в обобщенном параметрическом пространстве V конкретную реализацию машины. Идентифицируя с этой конкретной реализацией точку M^P пространства V , можно установить соответствие

$$M^P = M^P(p^P). \quad (2)$$

Пусть $p^i, i = 1, 2, \dots, N^i$ – множества обобщенных параметров, каждое из которых соответствует той или иной машине-аналогу. Тогда, предполагая, что существует зависимость

$$f^i = f^*(p^i), \quad (3)$$

которую можно постулировать или определить, саму нагрузку f^P на исследуемую машину можно определить по той же зависимости

$$f^P = f^*(p^P). \quad = \quad (4)$$

При этом оператор L в уравнении (1) предполагается единым для всего множества (ряда) машин, включая и проектируемую. Из уравнения (1) можно определить зависимости

$$f^i = f^{\wedge}(u, t), i = 1, 2, \dots, N^i. \quad (5)$$

Здесь в уравнениях (5) параметры p^i являются фиксированными.

Нагрузки f^i можно также определить из экспериментально полученных данных:

$$f^i = f^E(u, P, t), i = 1, 2, \dots, N^i. \quad (6)$$

Таким образом, имея в распоряжении массивы данных, определяемые соотношениями (6), (5), (3), можно решить задачи идентификации самого оператора начально-краевой задачи L , включая и граничные условия, а также идентифицировать синтетическую зависимость

$$f^S = f^S(u, P, t), \quad (7)$$

которая удовлетворяет на множестве p^i некоторому критерию точности:

$$I_a(f^E - f^{\wedge}) \rightarrow \min. \quad (8)$$

Здесь I_a – некоторая варьируемая (исходя из специфики задачи, объекта, процесса или состояния) мера несоответствия результатов численных и экспериментальных результатов.

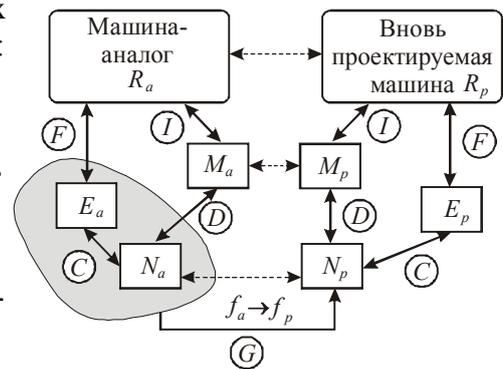
Принципиальным отличием данного подхода от известного варианта расчетно-

экспериментального метода [1] является то, что при традиционном подходе критерий соответствия строится на *полном* множестве машин и параметров, а в предложенном варианте метода – на *частном* множестве, соответствующем множеству машин-аналогов. Соответственно, существует опасность, что построенная таким образом численная модель с определенными по соотношениям (8), (4), (6) нагрузками f^P окажется недостаточно адекватной и точной для проведения исследований проектируемой машины M^P . Для устранения данного возможного несоответствия предлагается после проведения проектных работ и изготовления опытного образца провести проверочные испытания, в ходе которых можно аналогично определить новые значения f^E, \tilde{u}^E , соответствующих реальной машине. Таким образом, можно вычислить несоответствие и по нагрузкам (с одной стороны – принятым, предполагаемым, соответствующим «гибридной» расчетно-экспериментальной модели, с другой – зарегистрированным на реальном опытном образце), и по переменным состояниям (с одной стороны, предсказанным на основе численного моделирования с применением «гибридной» расчетно-экспериментальной модели, с другой – зафиксированным при эксперименте непосредственно на объекте).

Реализация подхода. Одним из вариантов реализации предложенного подхода является методология исследований, проиллюстрированная на рис. 1.

Рисунок 1 – Структура расчетно-экспериментальных исследований с применением «гибридных» моделей:

R – реальный объект (проектируемая машина);
 M, N, E – математическая, численная и экспериментальная модели исследуемых объектов; $*_a$ – модели, соответствующие машине-аналогу; $*_p$ – модели, соответствующие проектируемой машине; I, D, F, C – этапы идеализации, дискретизации, физического моделирования и верификации результатов; G – этап синтеза «гибридных» моделей



При реализации данной технологии исследований параллельно и взаимосвязанно проводятся 2 цикла расчетно-экспериментальных исследований объектов по традиционной технологии [1-6]: для машины-аналога и для проектируемой. Они разнесены по времени: сначала проводится цикл исследований машины-аналога (или некоторого их множества), далее по аналогии создается математическая и численная модели проектируемой машины. Следующим шагом является интеграция в расчетную модель N_p усилий f_p , вычисляемым по нагрузкам f_a , – качественно новый этап G , при осуществлении которого собственно создается «гибридная» модель объекта. Верификация результатов C производится на завершающем этапе всего цикла исследований (см. рис. 1).

Как видно из анализа предложенной технологии исследований, она может быть интегрируема не только в задачи анализа, но и в задачи синтеза (рис. 2). Действительно, на-

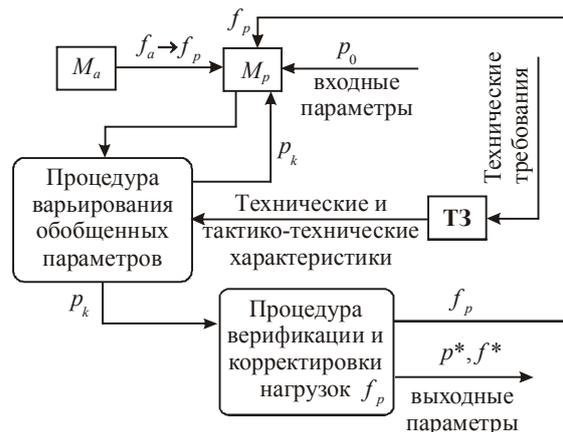


Рисунок 2 – Синтез параметров проектируемых машин с применением «гибридных» расчетно-экспериментальных моделей

грузку f_p можно трактовать как обобщенный параметр, который вначале определяется по результатам расчетно-экспериментальных исследований машины-аналога, а затем, после проведения процедуры оптимизации других параметров p_k с целью обеспечения требуемых технических и тактико-технических характеристик, проводится процедура уточнения самих нагрузок f_p (см. рис. 2). В результате в ходе вложенных итерационных процессов оптимизации и верификации получаем результирующий набор параметров p^*, f^* , удовлетворяющий и требованиям достоверности расчетных моделей (8), и критериям оптимальности $I \rightarrow \min, H \geq H_0$, где I – критерии качества, H – требования к техническим и тактико-техническим характеристикам, которые не должны быть хуже H_0 .

Заключение. Предложенный в работе подход имеет несомненные преимущества перед классическими вариантами исследований (например, по априорно постулированным коэффициентам динамичности), а также перед традиционными алгоритмами расчетно-экспериментальных исследований. Это, в частности: экономия времени и средств; высокая достоверность при определении эксплуатационных нагрузок, что повышает адекватность расчетных моделей проектируемых машин, а в конечном итоге, обеспечивает оптимальные структуры и параметры исследуемых машин по критериям надежности, долговечности, массы, стоимости; разрабатывается научно-обоснованная структура, параметры и свойства не только для численной модели отдельно взятой машины, но и для целой их серии, в т.ч. и тех, которые будут создаваться в будущем. Кроме того, отличительной особенностью данного подхода является присущая ему естественная возможность прямого встраивания в процесс поэтапного уточнения оптимальной структуры и параметров проектируемых машин.

В дальнейшем планируется апробировать описанный подход в ходе расчетно-экспериментальных исследований ряда машин.

Литература: 1. Решение задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Э.В. Глуценко [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – 2004. – №2. – С. 85–96. 2. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – 2006. – №1. – С. 57–79. 3. Расчетно-экспериментальная идентификация параметров численных моделей корпусных элементов транспортных средств / Е.В. Пелешко, А.Ю. Васильев, Г.Д. Гриценко [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – 2007. – №1. – С. 95–100. 4. Ткачук Н.А. Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем / Н.А. Ткачук // *Сб. научн. тр. “Динамика и прочность машин”*. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Вып.56. – С. 175–181. 5. Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем. / Н.А. Ткачук, А.А. Капустин // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. Тем. вып: Динамика и прочность машин. – 1999. – Вып.57. – С. 148–155. 6. Ткачук Н.А. Комбинированные расчетно-экспериментальные методы исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем / Н.А. Ткачук // *Механіка та машинобудування*. – 1999. – №1. – С. 37–46.

Чепурний А.Д., Глинін Г.П., Литвиненко О.В., Ткачук М.А.

ЗАГАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАШИН,
ЩО ПРОЕКТУЮТЬСЯ, НА ОСНОВІ ГІБРИДНИХ
РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ

Стаття містить опис узагальненого підходу до створення розрахунково-

експериментального методу досліджень, відмінною рисою якого є використання „гібридних” розрахунково-експериментальних моделей. При цьому навантаження на проектувану машину на першому етапі досліджень визначають за результатами експериментальних досліджень машини-аналога (або попередника). Визначена у результаті розрахункова модель є більш достовірною, точною та адекватною. Результати числових досліджень за отриманою гібридною моделлю є основою для обґрунтування параметрів машини, що проектується.

Chepurnoy A.D., Glinin G.P., Litvinenko A.V., Tkachuk N.A.

THE GENERAL APPROACH TO THE JUSTIFICATION OF PARAMETERS
OF DESIGNED MACHINES ON THE BASIS OF HYBRID
COMPUTATIONAL-EXPERIMENTAL MODELS

The paper contains description of the generalized approach to creation of computational-experimental method of researches. A distinguishing feature of offered approach is the use of hybrid computational-experimental models. On the first stage of researches the loadings on the designed machine are determined as a result of experimental researches of machine-analogue (or predecessor). The received computational model is more reliable, exact and adequate. Results of numerical researches on the got hybrid model are basis for the justification of parameters of machine which is designed.
