

в системах управления автомобилей, который включает режим срабатывания, режим нарастания тока до установившегося значения и режим отпускания, невозможно провести полное математическое моделирование работы системы, в которую он входит.

2. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования подтверждают возможность использования методики, предложенной в [1], для расчета полного цикла работы втяжного электромагнита.

### Список литературы

1. Гаранин А.Ю., Методика расчета динамических характеристик втяжного электромагнита постоянного тока., "Электротехника", № 11, 2001, с. 48-52.
2. Шлегель О.А., Горшков Б.М., Гаранин А.Ю., Попенко В.Н., Учет вихревых токов при расчете динамических характеристик электромагнита постоянного тока. "Электротехника", № 2, 2003, с. 51-54.

## **СЕТЕВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ УЧЕТА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАБОТЫ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Кривошеев И.А., Ахмедзянов Д.А., Иванова О.Н.

Уфимский государственный авиационный технический университет,  
г. Уфа

Современные средства информационных технологий – рабочие среды (FrameWork), управление потоками данных и документов (Work-Flaw), управление данными проектов и параллельного проектирования (PDM) и универсальные CAD/CAM/CAE-системы позволяют организовать системное проектирование двигателей на основе многоуровневого многоаспектного сетевого имитационного моделирования [1,3,4].

Элементы такого моделирования ГТД реализованы в системах DVIgW (Россия, <http://www.ad.ugatu.ac.ru>) [2], Gasturb (Германия, <http://www.gasturb.de>), GSP (Голландия, <http://www.nlr.nl/gsp>) и ГРАД [6]. Однако в этих моделях нет механизмов для учета точности получаемых данных и степени адекватности моделей, которые формируются в этих

средах.

В соответствии с предложенным в работе [1] методом, при сетевом имитационном моделировании с использованием решателей и рабочих сред (FrameWork) [5] последовательно наращивается дерево проекта. Любой функциональный элемент (ФЭ) имеет внутриуровневые и вертикальные (межуровневые) связи, реализуемые как информационные «потoki», с унифицированной (в рамках аспекта моделирования) структурой. На схеме, показанной на рис.1, двойными стрелками условно обозначены потоки, реализуемые в алгоритме ФЭ. Индексы: «П» - потоковые (внутриуровневые); «А» - аддитивные (вертикальные) связи.  $X$  – вектор входных (для алгоритма ФЭ).  $Y$  – вектор выходных переменных.

Особенность реализованного авторами в системе DVIGw решателя (процессора) состоит в том, что он позволяет для любой, в т.ч. некорректной, проектно-доводочной ситуации, подобрать значения «свободных» параметров. При этом в общем случае решается задача условной оптимизации – для части параметров указываются весовые коэффициенты и направления оптимизации, для части других – границы («верхняя» и «нижняя») и для всех параметров – базовые значения (по прототипу, по предыдущему проектному решению).

Системное проектирование в этих условиях ведется «сверху вниз» параметры подсистем подбираются по условиям, сформулированным для параметров надсистемы. На каждом шаге проектирования принимаются очередные решения по структуре, и наращивается дерево проекта.

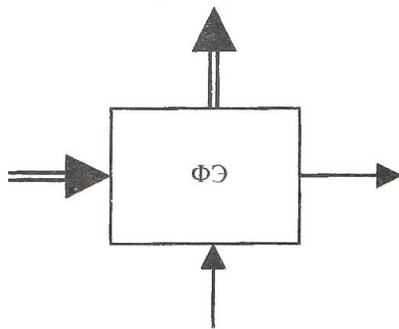


Рис. 1. Схема информационных связей ФЭ в дереве проекта

В настоящее время при проектировании двигателя используют алгоритмы ФЭ, представленные в детерминированной форме, именно такого рода модели используются в перечисленных выше системах моделирования. Однако на определенном шаге проектирования целесообразно

вводить в рассмотрение случайные факторы. Так в конструкторских моделях, где используются САД-системы, следует учитывать случайные отклонения геометрических параметров (вследствие погрешностей измерения и технологии). То же самое в технологических моделях, где используются САМ-системы. Для этапа доводки, где решаются задачи идентификации моделей по результатам испытаний, учитываются погрешности измерений.

Можно показать, что целесообразно изначально формировать алгоритмы ФЭ с учетом случайных факторов и использовать такие модели уже на ранних этапах проектирования.

В таком случае исходные условия на проектирование будут выглядеть не как обычно, когда задаются «коридоры» значений параметров надсистемы, а по каждому такому параметру будет указано математическое ожидание и доверительный интервал (или дисперсия, что более удобно). Часть параметров подсистем, которые приходится задавать в первом приближении, а затем уточнять, тоже может снабжаться соответствующей характеристикой вероятности случайных отклонений. Например, при подборе основных параметров цикла ГТД может быть указана требуемая тяга на взлетном режиме и ее дисперсия с той погрешностью, с какой будет осуществляться военная приемка двигателя. КПД узлов, полнота сгорания, коэффициенты восстановления полного давления могут быть заданы в первом приближении и указана вероятность (дисперсия или доверительный интервал) с учетом тех характеристик, на основе которых они определены. Тогда для параметров цикла будут подобраны их математические ожидания и значения дисперсий. На следующем шаге проектирования дерево проекта наращивается, в нем появляются элементы узлов (ступени компрессоров, турбины, ...) и уже их параметры эффективности задаются своими математическими ожиданиями и дисперсиями. Тогда можно вернуться и уточнить параметры эффективности узлов и их дисперсии, а значит, и другие параметры цикла ГТД (Рис. 2).

Возможность выявления связей (взаимной корреляции) параметров двигателя и их погрешностей с использованием предложенного сетевого представления позволяет при разработке и развитии систем моделирования ГТД действовать формально в несколько переходов: от систем уравнений к графическому сетевому представлению алгоритма, далее к цепочке простых рекуррентных операторов, связывающих параметры и к цепочке простых рекуррентных операторов, связывающих дисперсии параметров. Это достаточно информативно изображается графически при использовании предложенного сетевого представления внутренней структуры каждого модуля (модели ФЭ). Программно данная технология реализуется введением упомянутых выше блоков дополнительных опера-

торов в алгоритмах расчета модулей. При анализе корректности постановки проектно-доводочных задач, а особенно при идентификации модели по явно недостаточному для получения однозначного решения ограниченному набору замеренных параметров приходится использовать схему модели, показанную на рис. 4. На ней видны наборы входных и выходных данных модулей, наборы передаваемых по «потокам» параметров. Однако на этой схеме не видны взаимные связи параметров внутри модулей. Именно здесь и помогает предложенный метод сетевого представления внутренней структуры модулей.

Поскольку в разрабатываемой технологии в многоуровневой сетевой модели (дереве проекта) информационные потоки направлены снизу вверх (от подсистем к надсистемам) и слева направо (как реальные потоки вещества и энергии в двигателе), то внутренний алгоритм каждого элемента условно изображается с использованием предложенных графических структур, показанных на рис. 5.

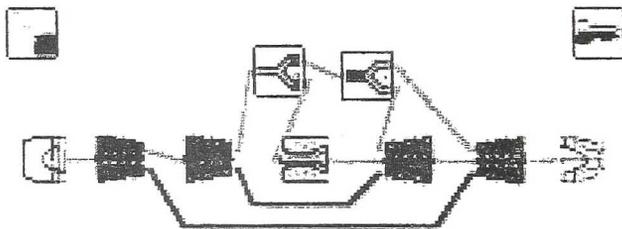


Рис. 2. Топологическая модель двухвального двигателя в системе DVIGw

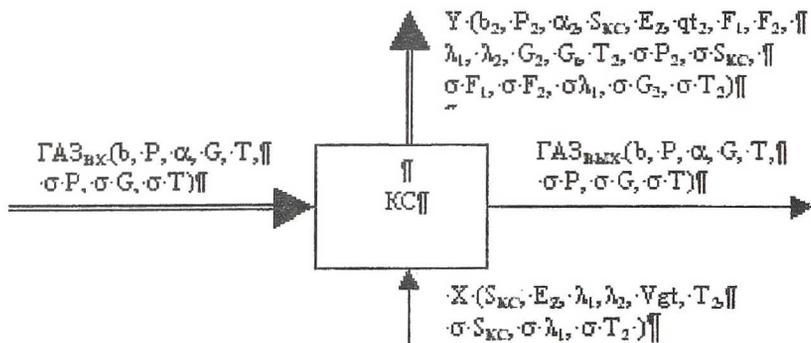


Рис. 3. Схема информационных связей ФЭ “камера сгорания”

Сетевое представление – внешнее (рис. 4) и внутреннее (рис. 5) для моделей и отдельных модулей позволяет проследить эти связи, контролиро-

вать “размерные цепочки” и корректность проектно-доводочных задач. Так например, используя принципы «раскрашивания графа» для сети, изображающей связи параметров в составной модели в целом, можно обнаружить, какие параметры позволяет однозначно определить конкретная модель при конкретном наборе замеренных в эксперименте параметров. Это позволяет спланировать последовательность действий над моделью при идентификации, выявить необходимые дополнительные зависимости (статистические и т.п.), которые позволят повысить достоверность и определить недостающие значения параметров, выбрать стратегию доводки двигателя.

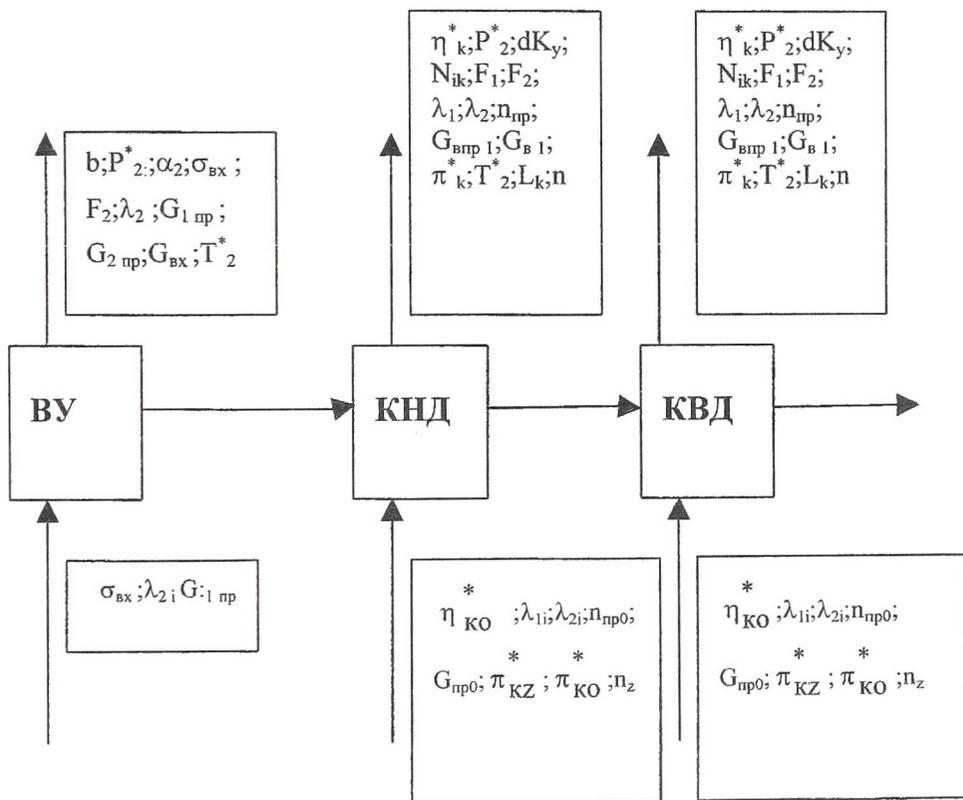


Рис. 4. Связь параметров функциональных элементов в модели двигателя на уровне ФЭ “входное устройство – компрессор”

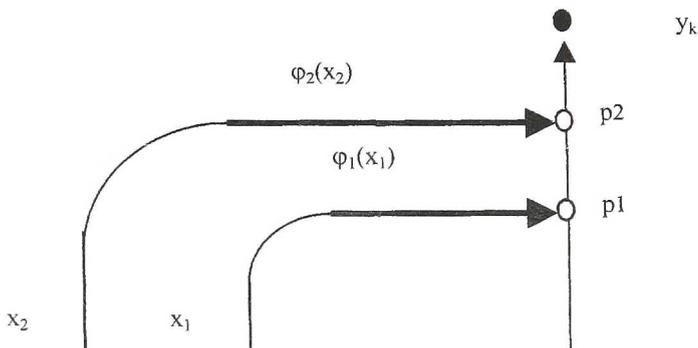


Рис. 5. Схема изображения фрагмента сети, изображающей внутреннюю структуру модулей в модели двигателя

Описанный метод моделирования является инвариантным к проектно-доводочным ситуациям, при этом позволяет дополнительно использовать информацию о требуемой или располагаемой точности измеренных или проектных параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ.

#### Список литературы

1. Кривошеев И.А., Ахмедзянов Д.А. Автоматизация системного проектирования авиационных двигателей. Учебное пособие. Уфа: УГАТУ. 2002. - 61 с.
2. Математические модели авиационных двигателей произвольных схем (компьютерная среда DVIG): Учебное пособие / Под ред. проф. Ахмедзянова А.М.; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 1998. - 128 с.
3. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей. Учебник для вузов / Под. ред. проф. Ахмедзянова А.М. М: Машиностроение, 2000. - 454 с.
4. Нариньяни А.С. Модель или алгоритм: новая парадигма информационных технологий. М.: Машиностроение. Информационные технологии. 1998 N4, с.3-9.
5. Ахмедзянов А.М., Кожин Д.Г. Система конструирования среды для математического моделирования сложных технических систем - САМСТО // Известия вузов. Авиационная техника, Казань, 1993, №1. - С. 56-59.
6. Тунаков А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей.-М.: Машиностроение, 1979. - 184с.