

СТРУКТУРА САПР МАЛОРАЗМЕРНОГО ДВС АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ.
ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДВС

С.н.с., к.т.н. С.А.Тимчук, с.н.с., к.т.н. И.В.Бычков, м.н.с.

В.П.Мануйленко, м.н.с. В.В.Комбаров, асп. П.Ф.Бушманов (каф.401)

Срок создания ДВС зачастую в нашей стране составляет 10-15 лет, включая время на экспериментальную доводку двигателя. Для малого предприятия, учитывая кредитную и налоговую политику государства, такие сроки равносильны банкротству. Одним из путей радикального сокращения сроков проектирования является применение САПР. Универсальные, интегрированные с производством САПР недоступны малым предприятиям производственной сферы вследствие высокой стоимости программного и технического обеспечения. Поэтому специализированные, адаптированные к условиям малых предприятий (малочисленность конструкторских кадров, недостаток финансирования, короткий цикл проектирования, частые модификации) САПР в настоящее время находят спрос.

Такая специализированная САПР для малого предприятия, проектирующего и готовящего к производству малоразмерные ДВС для легкомоторной авиации, разрабатывается нами в настоящее время.

Структура подобной САПР определена из следующих соображений: каждая из подсистем должна позволять автономное функционирование, подсистемы должны иметь общедоступное техническое обеспечение, подсистемы должны позволять проводить поэтапное наращивание и усложнение без изменения структуры. Подсистемы образуют две группы, соответствующие двум проектным процедурам: анализа и синтеза.

Сложность физических процессов, протекающих в ДВС, разброс параметров горюче-смазочных материалов, несовершенство технологии производства не позволяют провести в полной мере анализ конструкции расчетным путем. Здесь необходимо использовать испытательный стенд. Различие технического обеспечения приводит к целесообразности выделе-

ния двух подсистем анализа: систему компьютерного анализа конструкции (САК) и стендовую систему анализа (СС).

Процедура синтеза конструкции ДВС также неоднородна. Так, оформление графической документации может выполняться автономно и может быть выделено в отдельную подсистему. В условиях малого предприятия, размещающего свои заказы на других предприятиях, может оказаться полезным выделение технологической системы. Оставшиеся процедуры синтеза объединяются в конструкторскую систему (КС).

Специализированные банки данных (информационное обеспечение) используются как при анализе, так и при синтезе, следовательно, можно в общей структуре САПР выделить информационную систему.

Таким образом, САПР малоразмерного ДВС включает в себя следующие подсистемы: конструкторская, графическая, технологическая, анализа конструкции, стендовая, информационная.

Стендовая система отличается от остальных тем, что специфику объекта проектирования здесь отражает техническое обеспечение. Это обеспечивающие системы стенда и система измерения и регистрации экспериментальных данных. В частности, для обеспечения съема таких параметров, как частота вращения коленчатого вала, крутящий момент, тягу, мощность, расход топлива, среднее время наработки на отказ, напряжение и ток генератора, температуры (под свечей, масла, газов, топлива), давление (окружающей среды, масла), изменение давления (в камере сгорания, в картере, в выхлопном коллекторе, в различных сечениях резонансной трубы, во входном коллекторе), угол воспламенения рабочей смеси, температурное поле по головке, рубашке охлаждения, гильзе цилиндра, по камере сгорания, система измерения должна иметь возможность измерять не менее 18 параметров по 80 каналам. Это означает, что измерительная аппаратура должна обеспечивать до 100 измерений в секунду. Кроме того, система управления должна позволять проводить быструю переналадку под различные задачи и требуемую точность обработки данных.

Характеризуя состав прикладного программного обеспечения, можно отметить, что для КС оно должно включать пакеты комбинаторной струк-

турной оптимизации, позиционирования в диалоговом режиме, синтеза поверхностей и траекторий, параметрической оптимизации, идентификации математических моделей, расчета и оптимизации параметров и допусков; для САК оно должно включать пакеты статического, динамического, частотного анализа конструкции ДВС, анализа устойчивости, чувствительности конструкции ДВС, статистического анализа, расчета зависимостей выходных параметров подсистем и ДВС в целом. Остальные подсистемы могут использовать готовое прикладное программное обеспечение, поскольку меньше зависят от особенностей объекта проектирования.

Все перечисленные пакеты прикладных программ используют программные модули, реализующие математическую модель ДВС: системы топливоподачи, смесеобразования, наддува, газораспределения, рабочего процесса, механических процессов и прочности.

Разработка отдельных проблемноориентированных программных модулей нами начата с программного модуля анализа крутильных колебаний ДВС для пакетов частотного и динамического анализов.

Следует отметить, что для достижения высоких показателей соединения "ДВС-воздушный винт", двигатель должен быть высокооборотным с понижающим редуктором на выходном валу, что приводит к повышению энергонапряженности, усложнению характера крутильных колебаний и увеличению нагрузок от них на детали. Отсюда повышенные требования к теоретическому анализу крутильных колебаний, задачей которого является определение частот и форм собственных колебаний, анализ вынужденных колебаний, для установления возможности уменьшения амплитуд при резонансных колебаниях, выбор эффективных мер борьбы с ними, а также анализ возможных методов оценок степени опасности колебаний.

Решению данной задачи для авиационных ДВС уделялось много внимания в 30-е, 40-е годы, поэтому методический аппарат исследования колебаний в ДВС в основном остался на том уровне.

Особенность разрабатываемого проблемно-ориентированного модуля заключается в том, что, задача решается в матрично-векторной форме с применением существующего программного обеспечения ПЭВМ.

Система уравнений, описывающая крутильные колебания упругих систем со многими степенями свободы в матричной форме, имеет следующий вид /1/:

$$J\ddot{\varphi} + (K_e + K_{en})\dot{\varphi} + K\varphi = T \quad (1)$$

где J, K, K_e, K_{en} — матрицы редуцированных моментов инерции, жесткостей, коэффициентов внешнего и внутреннего трения соответственно; φ, T — векторы угловых перемещений масс и вынуждающих моментов.

Элементы матриц системы (1) и вектора возмущающих моментов рассчитываются по формулам, приведенным в /1-3/. Силами внутреннего трения пренебрегаем, поскольку авиационные ДВС отличаются малой металлоемкостью крутильной системы и применением легированных сталей с малыми гистерезисными потерями /2/. Кроме того, пренебрегаем трением масс крутильной системы о воздух (кроме воздушного винта) вследствие его малой вязкости и трением в подшипниках, так как в авиационных двигателях оно относится к области сил малого трения /2/.

Учитываются следующие возмущающие моменты: сил инерции и тяжести движущихся масс в кривошипно-шатунных механизмах, сил давления газов в цилиндрах двигателей, постоянная составляющая крутящего момента, передаваемого от источника к приемнику энергии.

На стадии исследования свободных колебаний не учитывается трение в системе и считаются нелинейные элементы линейными, то есть предполагаем колебания достаточно малыми /1,2/.

Решение однородной системы ищется в виде суммы синусоидальных колебаний. Проведя несложные преобразования, получим матричное уравнение:

$$\omega_c^2 \varphi_0 = H\varphi_0 \quad (2)$$

где φ_0 — вектор амплитуд угловых перемещений масс; ω_c — частота колебаний системы; $H = J^{-1}K$ — частотная матрица системы. Уравнение (2) выполняется в том случае, если ω_c^2 — собственное значение, а φ_0 — собственный вектор матрицы H .

Отсюда задача определения собственных частот и форм крутильных

колебаний системы сводится к определению всех собственных значений частотной матрицы системы и соответствующих им собственных векторов.

Рассматриваемая задача решается традиционно достаточно сложными и громоздкими методами Терских, Толле и тому подобными /1,2/, ориентированными на расчеты вручную.

Для расчета вынужденных нерезонансных колебаний предполагается, что установившиеся вынужденные колебания эквивалентны свободным колебаниям системы, преобразованной так, что одна из ее собственных частот равна частоте вынужденных колебаний /3/. Тогда, пренебрегая трением, для каждой гармоники получим:

$$\varphi_{e0} = (-\omega_e^2 E + H)^{-1} J^T T_0, \quad (3)$$

где E – единичная матрица, φ_{e0} – вектор амплитуд колебаний масс с частотой ω_e ; T_0 – вектор амплитуд данного гармонического момента, приложенных к каждой массе.

Получив амплитуды колебаний всех масс для каждой гармоники вынуждающих моментов отдельно, а затем, векторно их сложив, получим суммарные амплитуды и фазы колебаний каждой из масс. Ошибка от неучета трения для авиационных силовых установок не превышает 2% /2,3/.

При резонансе форма вынужденных колебаний близка к форме собственных /2/. Воспользуемся этим для определения амплитуд резонансных колебаний масс. Данные амплитуды определяются из условия равенства работ возмущающих сил и сил сопротивления за один цикл колебаний. Преобразовав приведенные в /2/ зависимости для расчета полной работы возмущающего момента и суммарной работы сил сопротивления по всем колебаниям вала за один цикл колебаний к матричной форме и проведя несложные преобразования, получим:

$$\varphi_{e0} = \frac{\varphi_0}{\varphi_{01}} \frac{1}{\omega_e (K_e \varphi_0)^T \varphi_0} \sqrt{[(C T_0)^T \varphi_0]^2 + [(S T_0)^T \varphi_0]^2}, \quad (4)$$

где C, S – соответственно диагональные матрицы косинусов и синусов углов поворота между вспышками в первом и i – и цилиндрах.

Алгоритм решения задачи исследования свободных крутильных коле-

баний укрупненно имеет следующий вид : определение моментов инерции сосредоточенных и протяженных масс, жесткостей и моментов сопротивления соединений, коэффициентов демпфирования; определение возмущающих моментов и разложение их в ряд Фурье; определение собственных частот и форм колебаний системы; определение амплитуд вынужденных колебаний и напряжений в соединениях.

Вычислительная программа реализована на языке Turbo Pascal и содержит управляющую программу и четыре основных программных модуля: формирования исходных матриц системы дифференциальных уравнений; расчета и разложения в ряд Фурье вынуждающих моментов; расчета собственных частот и форм колебаний системы; расчета амплитуд вынужденных колебаний системы. Причем, последние два модуля не привязаны к конкретному объекту и могут быть использованы для исследования колебаний любой механической системы, описываемых аналогичной системой дифференциальных уравнений.

Последовательность расчета организована путем реализации системы меню, которые достаточно понятны и снабжены строками подсказок.

Программа использует для операций с матрицами два программных модуля из пакета Turbo Pascal Numerical Methods Toolbox разработки фирмы Borland International, Inc.

Общий объем вычислительной программы 180,2 килобайт в откомпилированном виде.

Список использованных источников

1. Терских В.П. Расчеты крутильных колебаний силовых установок. - т.1, М.:Машигиз, 1953. - 259 с.
2. Маслов Г.С. Расчеты колебаний валов: справочник. - 2 изд., перераб. и доп. - М.:Машиностроение, 1980. - 151 с.
3. Литомирский В.К. Крутильные колебания валов авиационных двигателей. // Динамика и прочность коленчатых валов: сб. статей под ред. С.В.Серенсена, 1948. - С. 49-81.