

СПОСОБ ЭКВИВАЛЕНТНО-ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПОРШНЕВЫХ ДВС

Коровин А.С.
ОАО "СКБМ", г. Самара

Надежность конструкции любого двигателя определяется временем его работоспособности – ресурсом. На первом этапе разработки двигателя проводятся необходимые прочностные расчеты для обеспечения требуемого ресурса с последующим подтверждением длительными испытаниями. Такой процесс доводки двигателей весьма трудоемок и требует больших материальных затрат. Особенно нерационально проводить испытания модифицированных двигателей на повышенный ресурс для подтверждения их надежности.

В авиадвигателестроении эта проблема успешно решена путем испытания ГТД по сокращенным программам, эквивалентным по нагрузкам реальным условиям эксплуатации. Сущность сокращенных программ, получивших название эквивалентно-циклических (ЭЦИ), заключается в превышении доли времени работы двигателя на повышенных режимах, заданных техническими условиями эксплуатации, в частности по температурам газов и крутящему моменту, а также воспроизведении циклического нагружения.

Испытания поршневых автомобильных двигателей, как правило, проводятся на полный назначенный ресурс. Основная цель таких испытаний – выявление слабых мест звеньев в работе силовой установки. Здесь требования к весовым характеристикам, в отличие от авиационных двигателей, менее жесткие и критерием оценки надежности двигателя является километровый пробег. Такой же подход к испытаниям распространен и на двухтактные двигатели для мотоциклов, мопедов, подвесных лодочных моторов.

Предлагаемые способы создания программ ЭЦИ для поршневых двигателей (в основном дизельных) основаны на изменении расхода топлива от оптимального значения, угла опережения зажигания, ограничении подачи воздуха, дозировки в цилиндры абразивов, окисления озоном и добавления воды в масло и т.д., являются неприемлемыми для авиадвигателей, т.к. вносят искажения в действительные характеристики и рабочий процесс. Основными критериями соответствия ЭЦИ и эксплуатации являются соответствие износа деталей после ЭЦИ и эксплуатации на полный ресурс. При эксплуатации поршневого двигателя у деталей можно наблюдать повреждения, вызываемые различными процессами – механическими, физическими, приводящими к усталостным разрушениям, заеданиям, эрозии и коррозии. Общеизвестны главные причины повреждения основных деталей при эксплуатации двигателя и источники напряжений:

- частота вращения коленчатого вала и ее изменение влияет на протекающие рабочий процесс, тепловыделения и теплообмена;
- от газовых сил наибольшие повреждения получают поршень, поршневой палец и поршневые кольца, шатун, подшипники, шейки коленчатого вала.

При этом отмечаются следующие факторы, влияющие на износ деталей:

- температурное состояние деталей, приводящее к термоусталостным повреждениям;
- газовые силы, которые прямо пропорциональны частоте вращения вала;
- силы инерции, которые определяются частотой вращения вала;
- тангенциальные составляющие инерционных сил.

Воздействие всех вышеупомянутых факторов носит циклический характер. Таким образом, модель проведения испытания поршневого двигателя по времени сводится к усталостному виду (термическому, механическому, цикловому, контактному), что дает предпосылки к разработке программы ЭЦИ.

В общем виде эквивалентность испытаний при ЭЦИ и эксплуатации выражается известным соотношением

$$\sum_1^j S_{j_{\text{эсп}}}^m \cdot n_{j_{\text{эсп}}} = \sum_1^j S_{j_{\text{эци}}}^m \cdot n_{j_{\text{эци}}}$$

где S – переменная нагрузка (напряжение);

n – число циклов нагружения с уровнем S .

Показатели "m" степенного уравнения усталостной модели разрушения различны и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели "m" степенного уравнения усталостной модели разрушения

| №№ п/п | Вид усталости и узлы | материал | |
|-----------|-----------------------------|-------------|---------------------|
| | | алюм. сплав | сталь |
| 1 | Малоцикловая механическая | 3,5...4 | |
| 2 | Многоцикловая | 6...7 | |
| 3 | Термическая | 2...4 | |
| 4 | Механическая | | 6 |
| 5 | Контактная | | 3...6 |
| 6 | Для узлов с трением качения | | 3...3,3 |
| 7 | Резьбовые соединения | | 1,5...2 до 8...9 |
| 8 | Для шестерен редуктора | | 3 |

Для составления программы ЭЦИ необходимо иметь следующие показатели:

- среднестатистические значения изменения частоты вращения и мощности по режимам эксплуатации;
- характеристику изменения крутящего момента по эксплуатационным режимам;
- характеристики теплового состояния двигателя; изменения механических потерь по режимам работы;
- предварительные расчеты на прочность и долговечность основных деталей и узлов двигателя;
- статистика дефектов по ресурсной наработке; выбор наиболее слабого звена по результатам расчетов и испытаний;
- характер проявления дефекта;
- структурный параметрический анализ.

В качестве примера рассмотрен дефект начала разрушения пальца большой головки шатуна коленчатого вала поршневого двигателя. След начала разрушения проявляется на угле $\approx 15^\circ$ при повороте вала относительно верхней мертвой точки. Отсюда следует, что пиковые нагрузки создаются от максимального давления в момент воспламенения топливной смеси. Аналогичный характер начала разрушения проявляется на средней опоре и в опорах картера коленчатого вала, только с противоположной стороны.

Схема распределения нагрузок на коленчатый вал относительно пальца нижней головки шатуна приведена на рис. 1.

Кривошипно-шатунный механизм является сложной системой по своей структуре. Решение этой системы упрощается, если применить теорию сигнальных графов.

Применение этой теории позволило решить ряд практических задач в жидкостно-ракетных двигателях (ЖРД) и газотурбинных двигателях (ГТД) по диагностике и настройке двигателей.

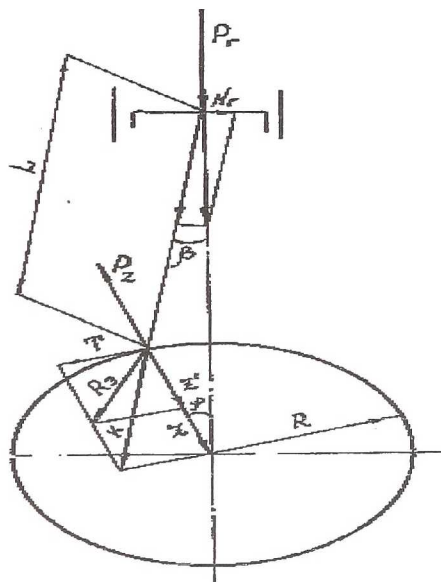


Рис. 1. Схема кривошипно-шатунного механизма поршневого двигателя

Сигнальный граф в полной форме представляет собой связи всех внутридвигательных параметров системы. Для решения и построения графа уравнения системы представляют в дифференциальной форме. Далее составляют граф, в котором определяют входные, внутридвигательные и выходные параметры. Сигнальный граф можно представить также в виде транспонированной диагональной матрицы с дискриминантом равным единице. При самом построении графа замкнутые контуры не допускаются, т.к. в таком случае задача становится неопределенной.

В нашем случае выходным параметром является время – долговечность элемента конструкции нижней головки шатуна. Связь времени с другими параметрами для построения графа можно представить следующими уравнениями.

Уравнения в общем виде для кривошипного пальца

$$1. M_{кр} = f(M')$$

$M_{кр}$ – крутящий момент при измерении

M' – крутящий момент без учета механических потерь в трансмиссии

$$2. M = M' / \eta_m$$

η_m – механические потери в двигателе

$\ln \eta_m = f(\ln n)$ – экспериментальная зависимость η_m от частоты вращения n

$$4. T_i = M/R \text{ (см. рис.1)}$$

$$5. P_r' = T_i \times \cos \beta / \sin(\varphi + \beta)$$

$$6. Z = P_r' \times \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta$$

$$7. Z' = Z - P_z$$

$$8. R_3 = \sqrt{(Z_1)^2 + T_1^2}$$

$$9. Q = 1,44 R_3,$$

где Q – долговечность

$$10. \tau = 10^6 / n \times (C/9,81 \times Q)^m$$

τ – время, m – показатель усталостной модели разрушения

Уравнения в дифференциальной форме

$$\delta M_{кр} / M_{кр} = \delta M / M$$

$$\delta M / M = \delta M' / M' - \delta \eta_m / \eta_m$$

$$\delta \eta_m = \eta_m \times C_1 \times \delta n / n$$

C_1 – коэффициент наклона характеристики

$$\delta T / T = \delta M / R$$

$$\delta P_r' / P_r' = \delta T_i / T_i$$

$$\delta Z / Z = \delta P_r' / P_r'$$

$$\delta Z' = \delta Z - \delta P_z \text{ или } \delta Z' = C_2 \times \delta Z$$

C_2 – коэффициент

$$R_3 \times \delta R_3 = Z' \times \delta Z' + T_1 \times \delta T_1$$

$$\delta Q / Q = \delta R_3 / R_3$$

$$\delta \tau / \tau = -\delta n / n - m \delta Q / Q$$

На рис.2 представлен граф связей параметров, определяющих нагрузки на палец кривошипно-шатунного механизма.

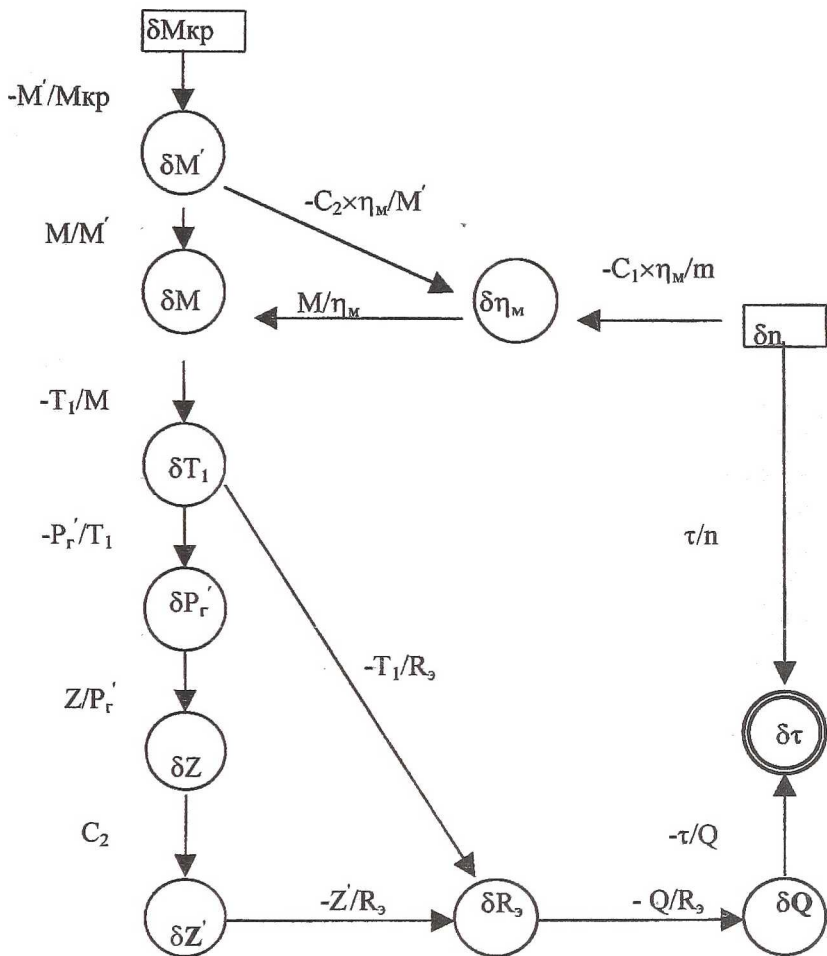


Рис. 2. Граф связи параметров
 □ - входные сигналы - $M_{кр}$ и n ;
 ○ - внутридвигательные параметры;
 ⊙ - выходной сигнал – время

В результате решения графа связей параметров по обозначенным стрелками путям и их суммирования получим уравнение в общем виде

$$\Delta(\ln \tau) = - (1-C_1) \Delta(\ln n) - (1-C_2) m \Delta(\ln (M_{кр})).$$

При принятых коэффициентах $C_1=0,334$; $m = 3,33$; $C_2= 0,027$ уравнение принимает окончательный вид

$$\Delta(\ln \tau) = -2,15 \Delta(\ln n) - 3,42 \Delta(\ln (M_{кр})).$$

Для составления программ ЭЦИ это уравнение удобнее представить в виде

$$\tau_{\text{уск}}/\tau_{\text{экс}} = (n_{\text{уск}}/n_{\text{экс}})^{2,15} + (M_{\text{уск}}/M_{\text{экс}})^{3,42},$$

где индексы экс – время и параметры при эксплуатации,
уск – время и параметры при ЭЦИ.

параметры $n_{\text{уск}}$ и $n_{\text{экс}}$, $M_{\text{уск}}$ и $M_{\text{экс}}$ – средние значения при эксплуатации и по программе ЭЦИ.

Температурные напряжения определяются формулой

$$t_{\text{ЭЦИ}} = t_{\text{экс}} + (\ln \tau_{\text{ц}}/\ln \tau_{\text{э}} - 1) \cdot \Delta / (\alpha_{\text{ц}} D_{\text{цк}} - \alpha_{\text{пк}} D_{\text{пк}}),$$

где $t_{\text{ЭЦИ}}$, $t_{\text{экс}}$ – температура головки цилиндра, например, под свечой в эквивалентно-циклических испытаниях и в эксплуатации соответственно;

$\tau_{\text{ЭЦИ}}$ и $\tau_{\text{экс}}$ – расчетная наработка на режимах ЭЦИ и в эксплуатации;

Δ – изменение зазора между гильзой и поршнем, соответствующее величине масляной пленки между ними ($\Delta=0,025$ мм);

$\alpha_{\text{п}}$, $\alpha_{\text{ц}}$ – коэффициент теплового расширения материалов поршня и цилиндра соответственно;

$D_{\text{цк}}$, $D_{\text{пк}}$ – соответственно диаметры цилиндра и поршня.

Эта формула определяет граничные (предельные) значения температур при ЭЦИ, превышение которых может привести заклиниванию поршня. Граничные условия температур подтверждены экспериментально и полностью совпали с результатами расчетов для двигателей П-032, П-039, "Вихрь-32" Практика показала, что при ЭЦИ следует держать температуру ниже граничной линии на 20...30⁰С.

Отсюда следует правильное распределение режимов нагрузки двигателя при эквивалентных испытаниях подобных эксплуатационным. Практика составления ЭЦИ на двигателях ПЛМ "Вихрь-30" и авиационных П-039 показала, что в первом случае по программе ЭЦИ за 125 часов вполне возможно подтвердить работоспособность мотора за 650 часов; во втором случае за 100 час подтвердить ресурс авиационного двигателя за 300 час.

Практика испытаний ДВС показала соответствие норм износа деталей двигателя, его систем и трансмиссии, включая редуктор.

Список литературы

1. Коровин А.С. Разработка метода настройки ЖРД замкнутых схем на основе структурного анализа с применением сигнальных графов// Дис. ... канд. техн. наук, Самара, ККБМ, 1976.
2. Коровин А.С., Максимов Н.Н. Пат. №2140064 //Способ эквивалентно-циклических испытаний ДВС. Заяв. 20.10.99 г.