

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ ИСПЫТАНИЙ ГИДРОАГРЕГАТОВ

Н.В. Горбатюк, канд. техн. наук,

ГП "Харьковское агрегатное конструкторское бюро", г. Харьков, Украина

Значительная часть затрат на обеспечение жизненного цикла гидроагрегатов (ГА) приходится на испытания по обеспечению надежности. Поэтому обоснованный выбор объемов испытаний, а также поиск путей их сокращения имеют важное практическое значение.

В разработке методики планирования испытаний классификация исследуемых ГА является ответственным исходным моментом. Она осуществляется по следующим отличительным признакам: способу применения, возможности испытаний на интервале времени и режиме нагружения, отличным от реальных.

По способу применения ГА подразделяются на малоресурсные и ресурсные. Если после применения по назначению на интервале времени $[0, t]$ ГА не подлежит дальнейшему использованию, то рассматривается малоресурсный образец. Если после завершения первого цикла работы на временном интервале $[0, t]$ ГА подлежит дальнейшему использованию на последующих циклах, то рассматривается ресурсный образец. Отмеченное отличие является существенным, так как при циклических испытаниях на одном образце происходит накопление повреждений в деталях. Оно существенным образом проявится при решении задачи выбора объемов испытаний.

Объем испытаний регламентируется выбранным планом испытаний [1 - 3]. Однако при определении продолжительности испытаний существующие планы не учитывают последствий, вызванных отказом изделий, и накопления повреждений при циклических испытаниях. Поэтому целью исследования является разработка методики выбора минимально необходимого объема испытаний ГА, которая гармонизирует требования к надежности в различных областях техники.

Для оценки надежности малоресурсные ГА подвергаются многократным циклическим испытаниям. При

этом n образцов испытываются циклами фиксированной продолжительности $t_{\text{цикл}}$ до отказа d или до выработки заданного числа циклов $N_{\text{и}}$. Точечная оценка вероятности безотказной работы ГА за наработку $N_{\text{и}}$ в рассматриваемой схеме определяется по зависимости

$$\tilde{P}_1 = 1 - \frac{d}{N_{\text{и}}}.$$

Вероятность отказа одного ГА $q_1 = 1 - \tilde{P}_1$ постоянна и не зависит от результатов испытаний других образцов. Тогда вероятность безотказной работы при испытаниях n ГА в течение $(n \cdot N_{\text{и}})$ циклов равна

$$\tilde{P}_n = \prod_{i=1}^n \tilde{P}_1 = \tilde{P}_1^n,$$

откуда

$$\tilde{P}_1 = \tilde{P}_n^{1/n} = \left(1 - \frac{d}{N_{\text{и}}}\right)^{\frac{1}{n}}.$$

Таким образом, циклические испытания n ГА при постоянной вероятности отказа в одном цикле эквивалентны однократным испытаниям $(n \cdot N_{\text{и}})$ образцов. В такой постановке задачи [3, 4] определяются границы областей приемки и браковки, средней продолжительности испытаний для проверки надежности.

В действительности предположение о постоянстве вероятности отказа с увеличением отработанного ГА количества циклов не соблюдается. Соотношение между оценками вероятности безотказной работы в первом цикле и по результатам испытаний в полном объеме аппроксимируют распределением Вейбулла

$$P = \exp\left(-\frac{t}{a}\right)^b,$$

где t – время;

a – параметр масштаба;

b – параметр формы.

Важными свойствами данного распределения являются гибкие аппроксимационные возможности, а также наличие жесткой функциональной связи между параметром формы и коэффициентом вариации наработки до отказа v [5]

$$v = \left[\frac{\Gamma(1 + 2/b)}{\Gamma^2(1 + 1/b)} - 1 \right]^{0,5},$$

где $\Gamma(\dots)$ – гамма-распределение.

Зависимость для приведения оценок вероятности безотказной работы ГА к первому циклу примет вид

$$\tilde{P}_{\text{нп}} = \left[1 - \frac{1}{N_{\text{и}}} \right] \left(\frac{1}{n} \right)^{\beta},$$

где β – параметр формы распределения Вейбулла b , учитывающий характер изменения вероятности отказа в одном цикле от числа циклов, ранее отработанных.

По вычисленной оценке $\tilde{P}_{\text{нп}}$, числу отказов d определяется эквивалентное число циклов испытаний с наработкой $t_{\text{нп}}$

$$N_{\text{экв}} = \frac{d}{1 - \tilde{P}_{\text{нп}}}.$$

Интервальные оценки вероятности безотказной работы обозначаются в виде функций:

$$P_{\text{нп}}^{\text{В}} = f_1(N_{\text{экв}}, d, \gamma),$$

$$P_{\text{нп}}^{\text{Н}} = f_2(N_{\text{экв}}, d, \gamma),$$

где $P_{\text{нп}}^{\text{В}}$, $P_{\text{нп}}^{\text{Н}}$ – соответственно верхняя и нижняя доверительные границы для параметров $P_{\text{нп}}$;

γ – доверительная вероятность.

Контроль надежности ГА осуществляется путем проверки выполнения условия

$$P_{\text{нп}}^{\text{Н}} \geq P_{\text{т}},$$

где $P_{\text{т}}$ – требуемый уровень надежности.

Таким образом, применение метода циклических испытаний ГА с приведением результатов оценок надежности к первому циклу позволяют существенно сократить объем испытаний и повысить достоверность оценки надежности за счет более полного использования остаточного ресурса и определения доверительных гра-

ниц для эквивалентного объема испытаний $N_{\text{экв}}$, который превосходит используемый.

По изложенной методике был проведен контроль надежности ряда ГА. Реализация метода многократных циклических испытаний с приведением оценки показателей надежности к первому циклу позволила по отношению к традиционному подходу уменьшить в 1,4 – 1,8 раза объем ресурсных испытаний [6].

Для ресурсных ГА объем испытаний устанавливается с использованием коэффициента надежности, который учитывает степень опасности ситуации, вызванной отказом, физический процесс деградации, параметр формы распределения, доверительную вероятность, количество испытываемых образцов.

ГА, влияющие на безопасность функционирования объекта, классифицируются по нормам безопасности.

Категория	Вероятность события	Последствия отказа
I	$10^{-3} - 10^{-5}$	Без последствий
II	$10^{-5} - 10^{-7}$	Усложнение условий
III	$10^{-7} - 10^{-9}$	Сложная ситуация
IV	$< 10^{-9}$	Катастрофическая ситуация

С точки зрения последствий наиболее опасными являются постепенные отказы, которые обусловлены накоплением усталостных повреждений и подчиняются логарифмически нормальному закону. По прочностной модели обеспечения надежности уравнение для определения коэффициента надежности (переработки) ресурса при стендовых испытаниях имеет вид

$$K_{\text{Н}} = 10^{\left[u_{\gamma}(t_{\text{п}}) + \frac{u_{\gamma}(t_{\text{ср}})}{\sqrt{n}} \right] \cdot S_{\text{lgN}}},$$

где $u_{\gamma}(t_{\text{п}})$, $u_{\gamma}(t_{\text{ср}})$ – квантили нормального распределения, полученные соответственно по доверительной вероятности $P(t)$ безотказной работы соответственно в пределах устанавливаемого ресурса $t_{\text{п}}$ и за время испытаний $t_{\text{ср}}$;

n – количество испытываемых образцов;

S_{lgN} – среднее квадратичное отклонение.

Изнашивание деталей и узлов гидроагрегатов – основная причина исчерпания ресурса. По износной моде-

ли обеспечения надежности зависимость для расчета коэффициента надежности записывается в виде

$$K_n = \frac{1 - v \cdot u \cdot \gamma(t_{cp})}{1 - v \cdot u \cdot \gamma(t_p)}$$

В заводской практике большее распространение получила модель износной надежности. Модель прочностной надежности реализуется для наиболее ответственных авиационных гидроагрегатов. Применение прочностной по отношению к износной модели требует в 1,4 – 2 раза большего коэффициента переработки.

Выбор режимов и продолжительности проведения испытаний на временном интервале меньшем, чем эксплуатационный, относится к наиболее трудным в рассматриваемой тематике задачам и поэтому практически не освещена в литературе [2]. При определении режимов ускоренных испытаний (УИ) для выполнения условия автомодельности [7] должна обеспечиваться эквивалентность технического состояния наиболее ответственных деталей и узлов ГА по основным разрушающим факторам (износ, усталость, старение) при форсированных испытаниях и в эксплуатации.

Процедура формирования на этой базе программы испытаний предусматривает декомпозицию ГА до уровня функциональных узлов, состояние деталей которых при испытаниях изменяется под воздействием физических процессов Π_i (износ, усталость, старение) исчерпания ресурса. При этом долговечность представляется как функция параметров работы ГА [8]

$$\Pi_i = f_i(p_B, \omega, T, t).$$

Идентичность состояния деталей и узлов АПМ при нормальных и ускоренных испытаниях достигается при выполнении равенства

$$f_i(p_B, \omega, T, t) = f_{iy}(p_{By}, \omega_y, T_y, t_y),$$

где y – индекс, которым отмечены параметры УИ.

Если при УИ выполняется условие автомодельности, то коэффициент подобия (ускорения) устанавливает соотношение между временем работы в реальных условиях и при форсировании режимов

$$K_y = t/t_y.$$

УИ подвергается ряд деталей и узлов, между коэффициентами ускорения и значениями нагрузок существует функциональная зависимость

$$K_{y_j} = \varphi_j(p_B, \omega, T, p_{By}, \omega_y, T_y), \quad j = \overline{1, k},$$

где k – количество деталей и узлов.

Вид каждой функции φ_j определяется типом элемента, его конструкцией и комплексом действующих нагрузок. Правильный выбор коэффициентов ускорения способствует существенному сокращению длительности испытаний, однако при чрезмерном форсировании соответствие между функциями f_i и f_{iy} может нарушиться. Поэтому формирование режимов УИ осуществляется при введении ограничений в виде максимальных значений параметров нагружения ГА в условиях реальной эксплуатации

$$p_y \leq p_{max}, \quad \omega_y \leq \omega_{max}, \quad T_y \leq T_{max}.$$

На основании расчета режимов УИ определяются значения K_y для ряда функциональных узлов и деталей, состояние которых изменяется при воздействии совокупности физических процессов. Вычисляется математическое ожидание среднего значения коэффициента ускорения

$$\overline{K}_y = \gamma(K_{y_j}, k)$$

и среднее квадратичное отклонение

$$s = \psi(K_{y_j}, \overline{K}_y, k).$$

Анализируются полученные результаты расчетов в целях принятия таких значений параметров нагружения (p_y, ω_y, T_y) , которым будут соответствовать приемлемая длительность УИ и минимальное значение среднего квадратичного отклонения коэффициента ускорения.

Для автоматизации вычислительных работ разработан алгоритм и составлена программа расчета режимов УИ на ПЭВМ. Оптимальный выбор режимов УИ осуществляется путем перебора параметров нагружения (давление, скорость, температура) по методу покоординатного спуска. Сущность его алгоритма заключается в сведении многомерной задачи к последовательным одномерным задачам, которые решаются методами опти-

мизации функции одной переменной. Критериями эффективности выбора служит среднее значение коэффициента ускорения, а степени несоответствия выбора – среднее квадратичное отклонение. Используемый подход позволяет установить зависимость параметров нагружения от временных характеристик работы стенда и оптимизировать циклограмму УИ.

Рассмотренная методика была реализована при выборе режимов испытаний ГА, используемых в наземной и воздушной технике. Реализованный коэффициент ускорения составлял от 2 до 17. Автомодельность УИ подтверждалась идентичностью вида законов распределения времени безотказной работы ГА и основных функциональных параметров, а также идентичностью характера разрушения ряда деталей, полученного при испытаниях и эксплуатации.

Изложенная методика выбора объемов стендовых испытаний агрегатов гармонизирует требования к надежности в различных областях техники и опробована положительным 10-летним применением в заводской практике при разработке более трех десятков ГА для мобильных машин различных тематик.

Выводы

1. Для сокращения объема испытаний малоресурсных ГА разработан метод многократных циклических испытаний ограниченного количества образцов с приведением контролируемых показателей надежности к первому циклу.

2. Планирование объема стендовых испытаний на надежность ресурсных ГА предложено осуществлять с учетом коэффициента переработки, который является функцией вероятности (последствия) отказа, доверительной вероятности, ресурса, количества испытуемых образцов, среднего квадратичного отклонения или коэффициента вариаций.

3. Выбор режимов ускоренных испытаний ГА, базирующийся на принципе эквивалентности технического состояния при эксплуатации и стендовых испытаниях по основным разрушающим факторам для критичных элементов конструкции с учетом ограничений на мак-

симальные значения параметров ГА, обеспечивает при испытаниях выполнение условий автомодельности.

Литература

1. Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И.А. Ушакова.– М.: Радио и связь, 1985.– 606 с.
2. Судаков Р.С. Испытания технических систем. Выбор объемов и продолжительности.– М.: Машиностроение, 1988.– 272 с.
3. Надежность машиностроительной продукции: Практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению.– М.: Изд-во стандартов, 1990.– 328 с.
4. Статистические задачи отработки систем и таблицы для числовых расчетов показателей надежности / Р.С. Судаков, Н.А. Северцев, В.Н. Титулов, Ю.М. Чесноков / Под ред. Р.С. Судакова.– М.: Высш. шк., 1975.– 608 с.
5. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций.– М.: Машиностроение, 1990.– 448 с.
6. Горбатюк Н.В., Горбатюк Р.Н. Методика экспериментального обеспечения надежности гидроприводов // Тяжелое машиностроение.– 2000.- № 11.– С. 11-16.
7. Башта Т.М., Бабанская В.Д., Головкин Ю.С. Надежность гидравлических систем воздушных судов / Под ред. Т.М. Башты.– М.: Транспорт, 1986.– 279 с.
8. Горбатюк Н.В. Ускоренные испытания гидропередач мобильных машин: Зб. наук. праць.- Кіровоград: КДГУ, 2000.- Вип. 7.- С. 81-87.

Поступила в редакцию 20.06.03

Рецензенты: канд. техн. наук, зам. Гл. конструктора Е.В. Павлюк, ХАКБ, г. Харьков; д-р техн. наук, профессор С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.