

ных уплотнений, радиусов, фасок и др.), упрощение конструкции, снижение веса.

Методы оценки  $M_n$ , которые применяются при обязательном взаимосвязанном конструкторско-технологическом анализе на этом этапе проектирования, такие же, как в предыдущем этапе.

При этом определяется не только  $M_n$ , но и суммарный КИМ изделия по рабочим чертежам деталей и сравнивается с заданным контрольным КИМ изделия.

На этапе опытной доводки ГТД после проведенного конструкторско-технологического анализа, когда обнаруживаются недостатки проектирования в обеспечении низкой металлоемкости, разрабатываются планы мероприятий по повышению КИМ по узлам изделия, по которым не получены заданные КИМ, и реализуются изменения конструкции, направленные на снижение металлоемкости и трудоемкости.

На этом этапе завершается отработка новых технологических процессов, направленных на повышение КИМ деталей изделия.

При конструкторско-технологическом анализе на основании поверочных расчетов КИМ узлов и деталей изделия с помощью ЭВМ делается уточнение КИМ в конструкторской документации на детали узлов.

На этом этапе проектирования составляется альбом с рекомендациями для серийного производства по обеспечению высоких КИМ деталей, а также директивные технологические процессы, охватывающие все основные направления работ по повышению КИМ, которые затем передаются на серийные предприятия вместе с эталонной конструкторской документацией.

На всех этапах участвует группа экономического анализа, которая постоянно в процессе проектирования производит расчеты трудоемкости и себестоимости изготовления изделия и его экономической эффективности.

УДК 62-75.001.2(045)

*В. Л. Каганов*

### *К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ПУТЕМ ОГРАНИЧЕНИЯ НАГРУЗКИ*

Ограничение нагрузки является наиболее распространенным приемом повышения надежности разрабатываемых изделий, применяемым в условиях жестких весовых ограничений [1], [2]. Огра-

нижение нагрузок реализуется применением в конструкции разнообразных защитных устройств. Однако, несмотря на распространенность этого технического приема, справочная и техническая литература ограничиваются лишь общими рекомендациями по обеспечению необходимых эксплуатационных режимов; не рассматривая взаимосвязь между характеристиками защитных устройств и показателями надежности изделий в целом [3], [4].

Необходимость такого подхода в настоящее время не вызывает сомнений, так как устройства защиты во многих случаях сами являются весьма сложными приборами (агрегатами) и включаются в состав наиболее ответственных и сложных систем, определяя логику их работы и надежность.

Пользуясь известной физической моделью надежности «нагрузка—прочность», все защитные устройства можно подразделить на две категории по характеру их взаимодействия с действующей нагрузкой:

— преобразовательные защитные устройства (регуляторы расхода и давления, стабилизаторы напряжения, частоты и тока, демпферы, фильтры и т. п.), назначением которых является преобразование исходного распределения случайной величины нагрузки  $f(Q)$  в распределение  $f(Q_3)$ , при котором обеспечивается нормальная работа изделия;

— предельные защитные устройства (предохранители всех типов), отключающие изделие или изменяющие режим его работы при достижении нагрузкой некоторого опасного предела.

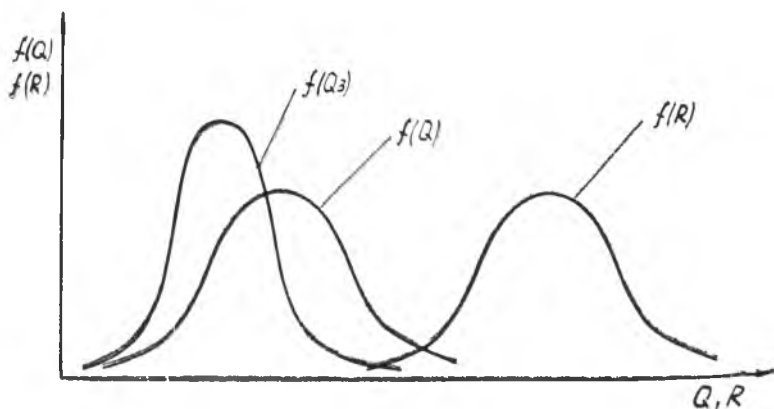


Рис. 1. Логика работы преобразовательных защитных устройств:  $Q$  — нагрузка;  $R$  — прочность;  $f(Q)$ ,  $f(Q_3)$ ,  $f(R)$  — распределения случайных величин нагрузки на входе в защитное устройство, на выходе из защитного устройства и прочности изделия

Показанная на графиках рис. 1 логика работы защитных устройств I категории может быть описана следующим образом.

$$q_{\text{исх}} = \text{Вер} \{Q > R\} > q_{\text{норм}};$$

$$q = \text{Вер} \{Q_3 > R\} \leq q_{\text{норм}},$$

где  $q_{\text{исх}}$  — исходный уровень вероятности отказа изделия (без защиты);  $q_{\text{норм}}$  — нормативный уровень вероятности отказа изделия, заданный ТЗ;  $q$  — вероятность отказа изделия, имеющего защиту.

В дальнейшем, рассматривая работу защиты, будем считать, что распределения нагрузок и прочности подчиняются нормальному закону, как наиболее распространенному в практике. Если же в процессе проектирования или отработочных испытаний изделия будет установлено, что эти распределения подчиняются другому закону, то расчетные уравнения могут быть уточнены [5].

В случае достаточной эффективности защитного устройства I категории должно обеспечиваться условие

$$q \leq q_{\text{норм}} < q_{\text{исх}}.$$

при этом

$$q = F(-U_{R3});$$

$$U_{R3} = \frac{m_R - m_{Q3}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{Q3}^2}}; \quad (1)$$

$$q_{\text{норм}} = F(-U_{\text{норм}}); \quad (2)$$

$$q_{\text{исх}} = F(-U_{\text{исх}});$$

$$U_{\text{исх}} = \frac{m_R - m_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}; \quad (3)$$

где  $U$  — квантиль нормального распределения;  $m_{R(Q)}$  — математическое ожидание прочности (нагрузки);  $\sigma_{R(Q)}^2$  — дисперсия распределения прочности (нагрузки).

Из уравнения (1) и (2) разработчик может определить параметры защиты, обеспечивающей выполнение требований к надежности изделия.

Рассмотрим подробнее работу защитных устройств II категории. Показанная на графиках рис. 2 логика их работы может быть описана следующим образом:

$$q_{\text{исх}} = \text{Вер} \{Q > R\} > q_{\text{норм}};$$

$$q_I = \text{Вер} \{Q_{\text{оп}} > R\} \leq q_{I\text{норм}};$$

$$q_{II} = \text{Вер} \{Q_3 > R\} \leq q_{II\text{норм}}.$$

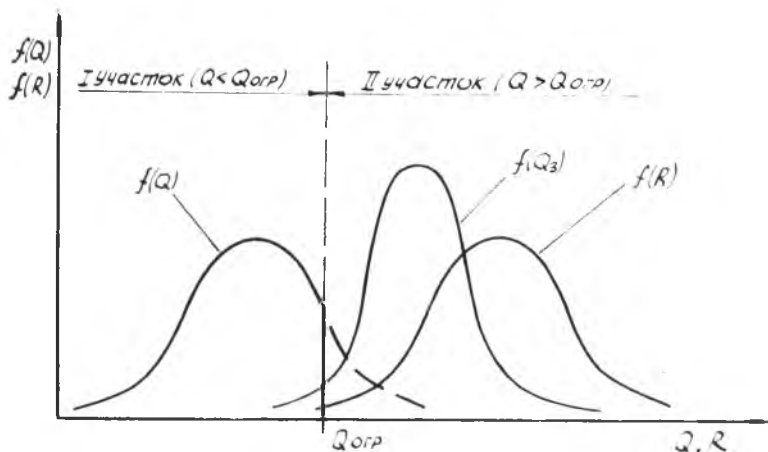


Рис. 2. Логика работы предельных защитных устройств:  $Q$  — нагрузка;  $R$  — прочность;  $Q_{огр}$  — уровень ограничения нагрузки;  $f(Q)$ ,  $f(Q_з)$ ,  $f(R)$  — распределения случайных величин нагрузки на входе в защитное устройство, нагрузки, реализуемой при срабатывании защиты, и прочности изделия

Так же, как и для защитных устройств I категории, должно обеспечивать условие

$$q \leq q_{норм} < q_{исх}.$$

Введением защиты исходное распределение нагрузки усекается на уровне  $Q_{огр}$  (настройка защиты). При этом нагрузка, действующая на изделие (нагрузочная характеристика), определяется:

— исходным распределением нагрузки  $f(Q)$  с параметрами  $m_Q$  и  $\sigma_Q$ , усеченном на уровне  $Q_{огр}$ ;

— распределением нагрузок  $f(Q_з)$  с параметрами  $m_{Q_з}$  и  $\sigma_{Q_з}$ , пропускаемых защитой на вход в изделие.

Считаем, что в общем случае  $m_{Q_з} > Q_{огр}$  вследствие инерционности защиты ( $Q_{огр}$  — входной сигнал,  $Q_з$  — выходной сигнал).

После введения защиты заданная вероятность отказа изделия приобретает различный физический смысл при работе изделия на различных участках нагрузочной характеристики.

На I участке  $q_1$  имеет обычный смысл вероятности отказа незащищаемого изделия, и считая ложное отключение также отказом, получаем:

$$q_1 = q_R + q_з q_{зл}, \quad (4)$$

где  $q_R$  — вероятность отказа изделия при  $m_{Q3} = Q_{\text{огр}}$ ,  $\sigma_{Q3} = 0$ :

$$q_R = F(-U_R); \quad U_R = \frac{m_R - Q_{\text{огр}}}{\sigma_R};$$

$q_3$  — вероятность срабатывания защиты:

$$q_3 = F(-U_3); \quad U_3 = \frac{Q_{\text{огр}} - m_Q}{\sigma_Q};$$

$q_{3л}$  — вероятность ложного отключения (срабатывания защиты):

$$q_{3л} = F(-U_{3л}); \quad U_{3л} = \frac{m_{Q3} - Q_{\text{огр}}}{\sigma_{Q3}}.$$

На II участке  $q_{II}$  имеет смысл вероятности нарушения работоспособности изделия при срабатывании защиты

$$q_{II} = q_{R3} q_3, \quad (5)$$

где  $q_{R3}$  — вероятность выхода из строя изделия

при  $q_3 = 1$  ( $m_Q \gg m_{Q3}$ ;  $\sigma_Q \rightarrow 0$ ):

$$q_{R3} = F(-U_{R3}); \quad U_{R3} = \frac{m_R - m_{Q3}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{Q3}^2}}.$$

Система уравнений, описывающих характеристики защиты, обеспечивающей выполнение требований к надежности изделия, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} q_R + q_3 q_{3л} &\leq q_{I \text{ норм}}; \\ q_{R3} q_3 &\leq q_{II \text{ норм}}; \\ U_{\text{нех}} &= \frac{m_R - m_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}; \\ U_3 &= \frac{Q_{\text{огр}} - m_Q}{\sigma_Q}; \\ U_{3л} &= \frac{m_{Q3} - Q_{\text{огр}}}{\sigma_{Q3}}; \\ U_R &= \frac{m_R - Q_{\text{огр}}}{\sigma_R}; \\ U_{R3} &= \frac{m_R - m_{Q3}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{Q3}^2}}. \end{aligned} \right\} (6)$$

При решении этой системы уравнений в качестве исходных данных используем:

$m_Q, \sigma_Q$  — параметры распределения нагрузки;

$m_R, \sigma_R$  — прочностную характеристику изделия;

$q_{I \text{ норм}}, q_{II \text{ норм}}$  — требования к надежности изделия.

Решая систему уравнений (6) для различных  $q_3$ , получаем характеристики защиты ( $Q_{огр}, m_{Q3}, \sigma_{Q3}$ ), обеспечивающей работу изделия с заданной надежностью относительно нагрузки  $Q$ :

$$Q_{огр} = m_Q + U_3 \sigma_Q;$$

$$\sigma_{Q3} = \frac{\sigma_R (U_R U_{3л} \pm U_{R3}) \sqrt{U_{3л}^2 - U_{R3}^2 + U_R^2}}{U_{3л}^2 - U_{R3}^2};$$

$$m_{Q3} = Q_{огр} + U_{3л} \sigma_{Q3},$$

$$\text{где } U_R = \frac{U_{исх} \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2} - U_3 \sigma_Q}{\sigma_R};$$

$$q_{R3} = F(-U_{R3}) = \frac{q_{II \text{ норм}}}{q_3};$$

$$q_{3л} = F(-U_{3л}) = \frac{q_{I \text{ норм}} - q_R}{q_3}.$$

На рис. 3 представлена типичная характеристика защиты. Ограничения нагрузки в каждом конкретном случае должны рассматриваться с точки зрения возможности создания защиты

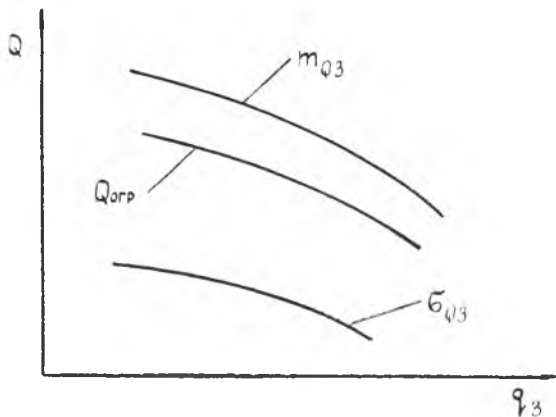


Рис. 3. Типичная характеристика защиты II категории

с заданными техническими характеристиками и с точки зрения принципиальной возможности выполнения изделием целевых задач при необходимом уровне ограничения нагрузки.

Если разработчиком изделия применена готовая защита (отработанная ранее), то в исходных данных прочностная характеристика изделия заменяется характеристикой защиты ( $m_{QЗ}$ ,  $\sigma_{QЗ}$ ) и решение системы уравнений (6) принимает вид

$$\sigma_R = \frac{m_{QЗ}(U_R U_{ЗЛ} \pm U_{RЗ}) \sqrt{U_R^2 - U_{RЗ}^2 + U_{ЗЛ}^2}}{U_R^2 - U_{RЗ}^2};$$

$$m_R = Q_{огр} + U_R \sigma_R,$$

$$\text{где } q_R = F(-U_R) = q_{1 \text{ норм}} - q_3 q_{ЗЛ};$$

$$q_{RЗ} = F(-U_{RЗ}) = \frac{q_{11 \text{ норм}}}{q_3};$$

$$U_{ЗЛ} = \frac{m_{QЗ} - Q_{огр}}{\sigma_{QЗ}}.$$

На рис. 4 приведена типичная зависимость прочностной характеристики изделия от  $q_3$  при заданных параметрах защиты.

Решенная задача позволяет в процессе проектирования проводить согласование прочностных характеристик изделия с характеристиками защиты, а также дает возможность в процессе отработки проводить обоснованный и целенаправленный анализ результатов испытаний для выполнения требований к на-

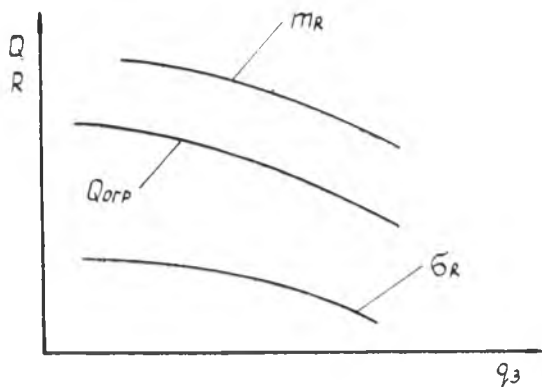


Рис. 4. Зависимость прочностной характеристики от  $q_3$  при заданных параметрах защиты II категории

дежности изделия как в процессе работы, так и при ее отключении защитой.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинин Г. В. Надежность устройств автоматики. — М.-Л.: Энергия, 1964. — 320 с.
2. Хевиленд Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность: Пер. с англ. — М.-Л.: Энергия, 1966. — 231 с.
3. Елифанов А. Д. Надежность автоматических систем. — М.: Машиностроение, 1964. — 336 с.
4. Справочник по надежности: В 3-х т.: Пер. с англ./Под ред. Бердичевского Б. Е. — М.: Мир, 1969—1970. — т. 1, 339 с., т. 2, 304 с., т. 3, 376 с.
5. Зажигаев Л. С., Кишьян А. А., Романиков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. — М.: Атомиздат, 1978. — 230 с.

УДК 621.45.0011.017

*Н. Д. Кузнецов, Г. А. Игнатов*

### МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ОПЫТНОЙ ОТРАБОТКЕ ГТД

Известно, что надежность закладывается при проектировании, обеспечивается в процессе производства, но реализуется она только в эксплуатации.

Для таких сложных машин как ГТД между проектом и эксплуатацией лежит большой интервал времени. Поэтому малейшая неточность проекта может со временем стать причиной отказа двигателя.

Улучшение работы по обеспечению надежности ГТД можно вести по многим направлениям. Немаловажная роль отводится совершенствованию организационно-технических решений по стимулированию качества самого процесса проектирования.

Предлагаемый подход к обеспечению надежности на самых ранних этапах создания двигателей носит комплексный характер. В его основе лежат четыре организационно-технические методики:

1. При закладке проекта предусмотрена развитая система технических заданий для исключения несогласованных решений, особенно по таким слабым местам, как «стыки» систем.