

УДК 629.735.07

СОСТОЯНИЕ СЛОЖНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА - ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ, КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И УРОВЕНЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Н.Н. СИРОТИН

В статье приведен новый подход к оценке уровня работоспособности и качества функционирования сложного технического объекта - газотурбинного двигателя (ГТД), предотказного состояния.

Ключевые слова: техническое состояние, сложный технический объект, работоспособность, качество функционирования.

В процессе эксплуатации у ГТД, как у любого сложного технического объекта, под действием различных факторов происходят как параметрические, так и структурные изменения.

Управление состоянием объекта и качеством его функционирования в этом случае будет эффективным, если оно проводится в моменты времени, когда параметры состояния объекта находятся еще в пределах допустимых значений. Это связано с тем, что при таком состоянии объекта не требуется больших ресурсов для возвращения его в исходное (номинальное) состояние по сравнению со случаями, когда параметры состояния объекта вышли за допустимые пределы.

Такой подход позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты (ресурсы) на управление состоянием объекта в процессе эксплуатации и он может быть основан на понятии уровня работоспособности и качества функционирования объекта.

Определяющими в процессах управления объектом являются параметры управления и параметры состояния $G(t)$ ГТД, которые характеризуются множеством значений внутренних параметров $X = \{x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_i(t_i), \dots, x_n(t_i)\}$, где $x_i(t_i)$ - значение i -го внутреннего параметра в момент времени t_i .

Для качественного и безопасного функционирования работоспособного сложного технического объекта, например ГТД, справедливо $X_{\text{пред min}}^V \cup X_{\text{доп min}}^V \cup X^V(t) \cup X_{\text{доп max}}^V \cup X_{\text{max пред}}^V$, где V - знак, отражающий учет изменения внутренних параметров как от влияния деградации, так и от воздействия других повреждающих факторов; $X_{\text{доп min}}^V$, $X_{\text{доп max}}^V$ - допустимые наименьшие и наибольшие значения внутренних параметров, превышение которых приводит к недопустимому снижению качества и безопасности функционирования объекта; $X_{\text{пред min}}^V$, $X_{\text{max пред}}^V$ - предельные значения внутренних параметров, превышение которых определяет невозможность физической реализации объекта; $X^V(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t)\}$ - множество значений внутренних параметров в момент времени t .

Допустимые изменения значений внутренних параметров определяют обеспечение получения значений выходных параметров также в допустимых пределах, являющихся переменными на выходах элементов и подсистем объекта. Тогда безопасное функционирование работоспособного объекта (ГТД) определяется неравенствами:

$$X_{\text{пред min}}^V \cup X_{\text{доп min}}^V \cup X^V(t) \cup X_{\text{доп max}}^V \cup X_{\text{max пред}}^V; \quad (1)$$

$$Y_{\text{пред min}} \cup Y_{\text{доп min}} \cup Y(t) \cup Y_{\text{доп max}} \cup Y_{\text{max пред}}, \quad (2)$$

где $Y_{\text{доп}}$ - допустимые значения выходных параметров, определяемые техническими требованиями на объект; $Y_{\text{пред}}$ - предельные значения выходных параметров, превышение которых приводит к невозможным условиям выполнения требуемых функций при функционировании объекта; $Y_{\text{кр}}$ - критическое значение параметра, при котором работа объекта принципиально невозможна.

Неравенства (1) и (2) определяют область работоспособности объекта G , где он работоспособен. Форма области G в координатах выходных параметров может иметь простую (рис. 1) или сложную (рис. 2) конфигурацию, определяемую размерностью пространства.

Если работоспособность объекта оценивается в двухмерном пространстве по двум параметрам, то область G в простейшем случае будет определяться квадратом G (рис. 1). В общем случае каждая граничная сторона области может описываться соответствующими кривыми, а точки пересечения кривых границ будут определять конфигурацию области работоспособности.

Эффект функционирования сложного технического объекта (ГТД) состоит в формировании требуемых значений $Y(t_i)$. Однако эффект как параметр, характеризующий результат функционирования объекта, не определяет, какими усилиями он достигнут, так как эффект сам по себе говорит лишь о полученном результате, но не полностью характеризует качество функционирования ГТД для достижения цели.

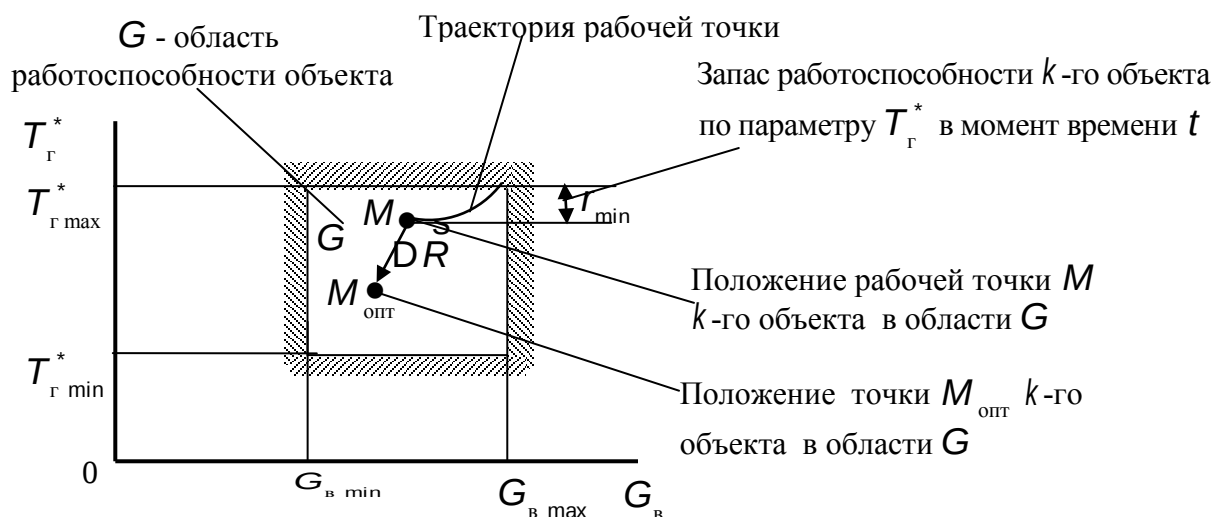


Рис. 1. Простая конфигурация области G : $T_{\text{г}}^*$ - температура заторможенного газа перед турбиной;

$G_{\text{в}}$ - расход воздуха; M - рабочая точка; $M_{\text{опт}}$ - точка области, где эффективность ГТД максимальна; DR - дополнительные затраты

Если же уровень полученного эффекта поставить в соответствие с затратами для его достижения, то можно говорить об эффективности функционирования ГТД $R(t)$. В качестве показателя эффективности функционирования ГТД может выступать показатель в виде затрат на функционирование объекта для получения $Y(t_i)$ в момент времени t_i .

С определенными допущениями можно утверждать, что максимальная эффективность функционирования объекта (ГТД) $R_{\text{max}}(t)$ достигается при номинальных значениях внутренних параметров $X_{\text{ном}}(t)$, которые позволяют получить оптимальные значения выходных параметров $Y_{\text{опт}}(t)$ с минимальными (оптимальными) затратами на функционирование объекта. В обла-

сти работоспособности ГТД G этот факт определяется точкой $M_{\text{опт}}$ (рис. 1, 2). Здесь работоспособность понимается как способность k -го объекта выполнять требуемые функции с определенной эффективностью $R_k(t_i)$.

Для других случаев, когда $Y(t_i) > Y_{\text{опт}}(t)$ затраты на функционирование ГТД будут превышать затраты при максимальной эффективности функционирования ГТД $R_{\text{max}}(t)$, превышения затрат DR будут определяться взаимным расположением рабочей точки M относительно точки $M_{\text{опт}}$ с $Y_{\text{опт}}(t)$, т.е. фактическими отклонениями выходных параметров $DY_k(t_i) = Y_k(t_i) - Y_{\text{ном}}(t_i)$, где $Y(t_i)$, $DY_k(t_i)$ - множество значений выходных параметров и их отклонений k -го объекта в момент времени t_i от номинального значения $Y_{\text{ном}}$, заданных в нормативных требованиях к функционированию объекта.

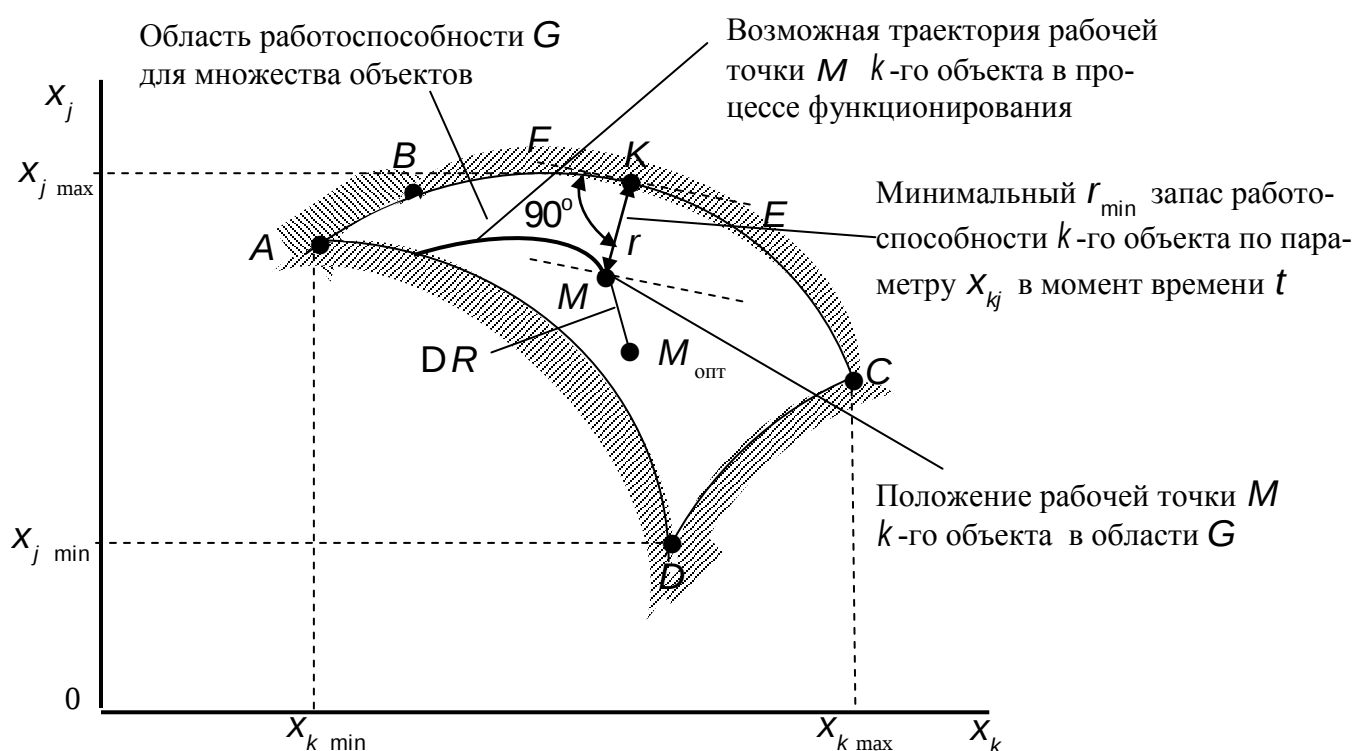


Рис. 2. Сложная конфигурация области G : AB и DC , BC и AD - верхняя и нижняя, правая и левая границы допустимых изменений параметра X_j соответственно; M - рабочая точка; $M_{\text{опт}}$ - точка области, где эффективность ГТД максимальна; DR - дополнительные затраты

Эти отклонения выходных параметров относительно номинальных значений характеризуются также кратчайшим расстоянием рабочей точки M до границ допустимых значений

$$r = |Y_k(t_i) - Y_{\text{max}}(t_i)| \text{ при возрастании выходного параметра в процессе эксплуатации и}$$

$$r = |Y_k(t_i) - Y_{\text{min}}(t_i)| \text{ при уменьшении выходного параметра в процессе эксплуатации.}$$

Здесь $Y_{\text{max}}(t_i)$ и $Y_{\text{min}}(t_i)$ - множества максимальных и минимальных значений выходных параметров, определяющих границы области работоспособности объекта (ГТД).

Соответственно величина расстояния между точками $M_{\text{опт}}$ и рабочей точкой M может интерпретироваться как величина дополнительных затрат, а параметр расстояния между этими точками DR как параметр, характеризующий эффективность функционирования объекта. Для случая максимальной эффективности функционирования ГТД $DR=0$, если рабочая точка M не совпадает с точкой $M_{\text{опт}}$, то $|DR| > 0$.

В частности, для ГТД $R_{\text{max}}(t)$ достигается тогда, когда требуемая тяга обеспечивается: при меньших значениях расхода топлива; при оптимальной температуре газа перед турбиной, при которой возможна меньшая повреждаемость материала лопаток турбины и рациональный расход ресурса; при расходе воздуха, когда мощность для привода компрессора минимальна и т.п.

В процессе эксплуатации вследствие деградации и воздействия повреждающих факторов происходит изменение состояния объекта, что отражается в области G как движение рабочей точки M к границам области. Достижение требуемых функций объектом происходит при сниженном уровне эффективности функционирования объекта. Имеет место

$$R_k(t_i) < R_{\text{max}}; \quad (3)$$

$r = |Y_k(t_i) - Y_{\text{max}}(t_i)|$ при возрастании выходного параметра в процессе эксплуатации и

$r = |Y_k(t_i) - Y_{\text{min}}(t_i)|$ при уменьшении выходного параметра в процессе эксплуатации.

Неравенство (3) отражает эффективность функционирования ГТД. Вторые неравенства отражают внешние условия работоспособности при эффективности $R_k(t_i)$.

Если имеется n границ допустимых предельных значений параметров, то имеет место $r = \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n\}$, где n - число границ. Тогда уровень работоспособности объекта или запас работоспособности по одному из рассматриваемых параметров определится как

$$r_{\text{min}} = \min_{1 \leq i \leq n} \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n\}.$$

Известно, что состояние технической системы полностью определяется, если заданы все координаты и скорости этой системы. В данном случае в качестве системы выступает рабочая точка M . Тогда состояние рабочей точки M в области работоспособности G будет полностью определено кратчайшим расстоянием ее до одной из границ допустимых значений выходных параметров

r_{min} и скоростью приближения рабочей точки M к этой границе $c = \frac{dr_{\text{min}}}{dt}$.

Соответственно, состояние системы с этими параметрами определяет потенциальную способность системы выполнять требуемые функции, т.е. определяет уровень работоспособности.

Поэтому параметры r_{min} и $c = \frac{dr_{\text{min}}}{dt}$ рабочей точки M объекта могут выступать в качестве параметров, характеризующих уровень работоспособности и качество функционирования объекта при соответствующей эффективности.

Кратчайшее (минимальное) расстояние рабочей точки M до границы допустимых значений будет определять минимально допустимый уровень работоспособности объекта. Тогда более точное определение уровня работоспособности и качество функционирования k -го объекта (ГТД) можно характеризовать значениями следующих параметров:

- кратчайшим расстоянием рабочей точки M до границы допустимых значений. Параметр определяет уровень работоспособности ГТД;

- превышением затрат DR для выполнения требуемых функций относительно затрат для оптимального варианта функционирования. Параметр характеризует эффективность объекта;
- скоростью изменения кратчайшего расстояния рабочей точки M до границы допустимых значений. Параметр определяет скорость расхода ресурса объекта.

Выводы

1. Управление состоянием объекта и качеством его функционирования будет эффективным, если оно проводится в моменты времени, когда параметры состояния объекта находятся еще в пределах допустимых значений. Это позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты (ресурсы) на управление состоянием объекта в процессе эксплуатации.
2. Рациональным подходом такого управления является подход, основанный на понятиях уровня работоспособности и качества функционирования объекта.
3. Точное определение уровня работоспособности и качества функционирования объекта характеризуется кратчайшим расстоянием рабочей точки M до границы допустимых значений, превышением затрат DR для выполнения требуемых функций относительно затрат для оптимального варианта функционирования объекта и скоростью изменения кратчайшего расстояния рабочей точки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сиротин Н.Н. и др. Основы конструирования производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе CALS технологий: учебник в 3 кн. - М.: Наука. - Кн. 3: Эксплуатация и надежность ГТД и ЭУ, 2012.

QUALITY OF FUNCTIONING, LEVEL OF WORKING CAPACITY AND CONDITION OF A DIFFICULT TECHNICAL PLANT

Sirotin N.N.

The paper deals with a new approach to an estimation of level of working capacity and quality of a difficult technical plant functioning.

Keywords: a difficult technical plant, working capacity, quality of functioning.

Сведения об авторе

Сиротин Николай Николаевич, 1933 г.р., окончил КАИ (1958), доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии им. проф. Н.Е. Жуковского, главный научный сотрудник ФГУП ГосНИИ ГА, автор более 220 научных работ, область научных интересов - повреждаемость и работоспособность ГТД в процессе проектирования, доводки, производства и эксплуатации.