



Свердлов А.Б.

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

В статье приведены основные результаты анализа надежности газоперекачивающих агрегатов (ГПА), эксплуатируемых на газотранспортных предприятиях России. Рассмотрены основные конструктивные и функциональные особенности ГПА, вопросы обеспечения надежности в газовой промышленности. Представлена структурно-функциональная модель надежности (СФМН) ГПА, составленная на основе проведенного исследования надежности ГПА.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, надежность, отказ, вероятность безотказной работы.

Газоперекачивающий агрегат – сложная энергетическая установка, предназначенная для компримирования природного газа, поступающего на компрессорную станцию (КС) по магистральному газопроводу [1]. Газоперекачивающие агрегаты – основное технологическое оборудование компрессорных станций, обеспечивающие необходимый режим транспортировки газа по магистральному газопроводу. Газоперекачивающий агрегат компрессорных станций состоит из центробежного нагнетателя и привода. В качестве привода главным образом используют газовые турбины (стационарные, авиационные и судовые) и электродвигатели.

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик газоперекачивающего агрегата является его надежность. В соответствии с ГОСТ 13377-75 надежность определяется как свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки. Надежность агрегата в общем случае определяется надежностью его элементов, систем, его обслуживающих, и характером их взаимодействия.

Вопросы надежности особо актуальны в газовой промышленности. Основная часть парка энергетического оборудования газотранспортных предприятий России была введена в эксплуатацию в 1980-1990 гг., и значительная его доля работает сверх установленного производителями нормативного срока. Такое положение не может не отражаться на надежности работы энергохозяйства. Об этом свидетельствует то, что число нарушений, связанных с износом оборудования, достигает 30% общего количества нарушений в работе энергохозяйства [2].

Обеспечение надежности ГПА зависит от решения комплекса научных, технических, экономических и организационных задач на всех этапах – от проектирования до эксплуатации. Решение задач надежности связано с развитием теории надежности, которая основана на использовании методов прикладной математики – теории вероятностей и математической статистики [3].

С теорией и практикой надежности тесно связаны такие понятия, как работоспособность и отказ оборудования. Работоспособность – это состояние объекта, при котором

он способен выполнять определенные функции, сохраняя значения параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Отказ представляет собой событие, заключающееся в нарушении работоспособности и требующее остановки агрегата.

В основу расчетов надежности заложены методы теории вероятности и математической статистики [4-8], которые применяют и к особенностям надежностных моделей ГПА. Отказ агрегата в работе и его восстановление – это два противоположных случайных события. На практике принято оперировать со случайными величинами. Случайной принято называть величину, которая может принимать любое заранее неизвестное значение.

В настоящее время оценка показателей надежности ГПА на газопроводах осуществляется системой показателей, основанных на определении времени нахождения агрегата в том или ином эксплуатационном состоянии:

- суммарном времени нахождения агрегата в работе T_P за отчетный период T_K ;
- времени нахождения агрегата в резерве $T_{Pез}$;
- времени нахождения агрегата в плановом ремонте $T_{ППР}$;
- времени вынужденного простоя $T_{ВП}$.

Обычно за отчетный период принимается календарный год:

$$T_K = T_P + T_{Pез} + T_{ППР} + T_{ВП} = 365 \text{ дней.}$$

На основе сопоставления приведенных временных состояний агрегата и определяются показатели его надежности. Вероятность безотказной работы $P(t)$ является основным показателем надежности, который показывает вероятность того, что в заданном интервале времени t (или в пределах заданной наработки) отказа не возникнет.

В основу оценки и прогноза эксплуатационной надежности ГПА может быть положена структурно-функциональная модель надежности (СФМН) ГПА. Структурно-функциональная модель надежности – вероятность безотказной работы (ВБР) – комплексный показатель долговечности, который в полной мере характеризует надежность сложных технических систем. Структурно-функциональная модель надежности ГПА отражает обобщенный показатель надежности (ПН) через структурную и функциональную декомпозицию ГПА, причины и характер отказов, рациональную номенклатуру выходных параметров, модель работоспособности, структуру и вид исходной информации о надежности подсистем ГПА, а также наработки, режимы работы, СТО и ремонта, правила и условия эксплуатации. СФМН наиболее полно характеризует надежность исследуемого объекта, отображает его основные конструктивные и функциональные особенности, режимы работы, причины и характер возникающих отказов. Исходя из результатов проведенного комплексного исследования надежности ГПА, структурно-функциональная модель надежности ГПА для периода эксплуатации принимает вид:

$$P_{об}(\tau_{\Sigma}) = \Phi_1 [Y_i (T_P, T_{Pез}, T_{ППР}, T_{ВП}); Z_j (T_P, T_{Pез}, T_{ППР}, T_{ВП}); X_k (T_P, T_{Pез}, T_{ППР}, T_{ВП}); [Y_i]; [Z_j]; [X_k]; R_1; \eta; \varepsilon; \zeta] * \Phi_2 [\lambda_{1\mu} (T_P, T_{Pез}, T_{ППР}, T_{ВП}); \lambda_{2\mu} (T_P, T_{Pез}, T_{ППР}, T_{ВП}); \lambda_{3\mu} (T_P, T_{Pез}, T_{ППР}, T_{ВП}); r] * \Phi_3 [\lambda_{4v} (T_P, T_{Pез}, T_{ППР}, T_{ВП}); \rho] * \Phi_4 [t_{ТО}, n_{ТО}, t_{нр}, n_{нр}, t_{устр}, m, t_3, n_3]. \quad (1)$$

В выражении (1):

- $P_{об}(\tau_{\Sigma})$ – вероятность безотказной работы ГПА, как единого объекта, обобщенный показатель надежности агрегата за рассматриваемое время эксплуатации (τ_{Σ});

- $\Phi_1 [Y_i (T_P, T_{Pез}, T_{ППР}, T_{ВП}); Z_j (T_P, T_{Pез}, T_{ППР}, T_{ВП}); X_k (T_P, T_{Pез}, T_{ППР}, T_{ВП}); [Y_i]; [Z_j]; [X_k]; R_1; \eta; \varepsilon; \zeta]$ – оператор, определяющий вероятность выполнения системы условий работоспособности для заданных условий эксплуатации и режимов работы ГПА в зависимости от наработки и режима эксплуатации. Учитывает изменение и влияние рассеивания следующих значений:

- Y_i – выходные обобщенные параметры ГПА (уровень шума в машзале, общее вибросостояние агрегата, загазованность цеха или укрытия ГПА, давление газа на выходе компрессорной станции, температура газа на выходе компрессорной станции и т.д.);

- Z_j – выходные параметры отдельных подсистем (температура, давление и уровень машинного масла; уровень вибрации электродвигателя, мультипликатора, нагнетателя; защита от помпажа нагнетателя; ограничение по мощности, cosφ электродвигателя, напряжению в сети и т.д.);

- X_k – выходные параметры отдельных элементов агрегата (температура подшипников электродвигателя, давление масла в уплотнениях нагнетателя, осевой сдвиг ротора нагнетателя, температура обмоток статора электродвигателя, сопротивление изоляционных прокладок электродвигателя, диаметральный зазор между шейками валов и вкладышами подшипников, осевой разбег вала колеса мультипликатора и т.д.); количество выходных параметров Y_i, Z_j, X_k в соотношении (1) определяется существом решаемой задачи, конструктивными особенностями определенного ГПА и режимом работы. Между параметрами возможно наличие корреляционной связи.

- $[Y_i], [Z_j]$ и $[X_k]$ – диапазоны допустимых значений выходных параметров, зависящие в общем случае от времени и условий эксплуатации;

- R_1 – множество вещественных чисел, которому принадлежат все возможные и допустимые значения;

- $T_P, T_{Pез}, T_{ППР}, T_{ВП}$ – наработка ГПА в единицах времени на различных режимах в период эксплуатации (время нахождения агрегата в работе, резерве, плановом ремонте и вынужденном простое соответственно);

- η, ε, ζ – количество Y_i, Z_j, X_k выходных параметров, характеризующих работоспособность ГПА.

Оператор $\Phi_1 (Y_i (); Z_j (); X_k (); \dots)$ определяет вероятность P_n выполнения ГПА условий работоспособности для заданных параметров в зависимости от допустимых пределов при определенном режиме эксплуатации и времени работы: $P_n = \{Y_1 \in [Y_1]; Y_2 \in [Y_2]; \dots Y_i \in [Y_i]; \dots Z_j \in [Z_j]; \dots X_k \in [X_k]\}$. По существу, оператор Φ_1 определяет параметрическую надёжность.

• $\Phi_2 [\lambda_{1\mu} (T_B, T_{Pez}, T_{ППР}, T_{ВГД}); \lambda_{2\mu} (T_B, T_{Pez}, T_{ППР}, T_{ВГД}); \lambda_{3\mu} (T_B, T_{Pez}, T_{ППР}, T_{ВГД}); r]$ – оператор, характеризующий влияние на надежность ГПА мелких конструктивных и технологических дефектов, не учитываемых оператором Φ_1 , а также влияние качества ремонтов и технических обслуживаний. Учитывает изменение и влияние рассеивания следующих значений:

◦ $\lambda_{1\mu}; \lambda_{2\mu}; \lambda_{3\mu}$ – интенсивности отказов μ -той подсистемы ГПА, обусловленные мелкими конструктивными, технологическими и ремонтными дефектами в период эксплуатации соответственно;

◦ r – количество μ -х подсистем, на которое условно разбит ГПА для оценки показателей надежности.

• $\Phi_3 [\lambda_{4v} (T_P); \lambda_{4v} (T_{Pez}); \lambda_{4v} (T_{ППР}); \lambda_{4v} (T_{ВГД}); \rho]$ – оператор, учитывающий влияние нарушений правил эксплуатации ГПА на его надежность. Учитывает изменение и влияние рассеивания следующих значений:

◦ $\lambda_{4v} (T_P); \lambda_{4v} (T_{Pez}); \lambda_{4v} (T_{ППР}); \lambda_{4v} (T_{ВГД})$ – интенсивности нарушения v -го правила эксплуатации ГПА в зависимости от режима эксплуатации, наработки;

◦ ρ – количество правил эксплуатации, рекомендуемых к выполнению.

• $\Phi_4 [t_{ТО}, n_{ТО}, t_{нр}, n_{нр}, t_{устр}, m, t_3, n_3]$ – оператор, характеризующий совместное влияние текущих отказов и принятой плано-предупредительной системы обслуживания и ремонтов ГПА на его техническую готовность. Учитывает изменение и влияние рассеивания следующих значений:

◦ $t_{ТО}; t_{нр}; t_{устр}$ – средняя продолжительность технического обслуживания (ТО), среднее время плановых ремонтов ГПА и среднее времена на устранение отказов;

◦ $m; n_{ТО}; n_{нр}$ – ожидаемое количество отказов, ТО, и плановых ремонтов за заданное время τ эксплуатации ГПА соответственно;

◦ t_3 – время поступления заявки;

◦ n_3 – ожидаемое количество заявок на работу.

Оператор $\Phi_4 [t_{ТО}, n_{ТО}, t_{нр}, n_{нр}, t_{устр}, m, t_3, n_3]$, по существу, представляет собой коэффициент технического использования ГПА.

Для расчета составляющих коэффициента технического использования объекта принимаем плано-предупредительную систему технических обслуживаний и ремонтов, согласно которой:

$$T_{\Sigma нто} = n_1 t_{ТО} + n_p t_p; T_{\Sigma нто} = m t_{устр}; \text{ где:}$$

◦ $n_{ТО}, n_p, m$ – число технических обслуживаний (ТО), планируемых ремонтов и отказов за рассматриваемое время эксплуатации;

◦ $t_{ТО}, t_p, t_{устр}$ – соответственно средние затраты времени на проведение ТО, планируемых ремонтов и устранения отказов.

СФМН может быть положена в основу оценки и анализа надежности ГПА на всех этапах проектирования, изготовления, пуско-наладочных испытаний, эксплуатации. При этом обеспечивается единый структурированный подход к анализу надежности со стороны конструктора, технолога, испытателя, заказчика, обслуживающего персонала, что позволяет построить универсальную базу данных для прогнозирования надежности и повышает вероятность нахождения истинной причины отказа.

Литература

1. **Козаченко А.Н.** Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов: Справочник / А.Н. Козаченко. – М.: Нефть и газ, 1999. – 463 с.
2. **Шварц Г.Р.** Долгосрочное прогнозирование технического состояния парка энергетического оборудования ОАО «Газпром» / Г.Р. Шварц, С.Н. Великий, А.А. Михель [и др.] // Газовая промышленность. – 2009. – № 628. – С. 26–31.
3. **Терентьев А.Н.** Надежность газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / А.Н. Терентьев, З.С. Седых, В.Г. Дубинский. – М.: Недра, 1979. – 207 с.
4. **Барлоу Р.** Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан. Пер. с англ., под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Советское радио, 1969. – 488 с.
5. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
6. **Гнеденко Б.В.** Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
7. **Калабро С.Р.** Принципы и практические вопросы надежности / С.Р. Калабро. Пер. с англ., под ред. Д.Ю. Панова. – М.: Маштностроение, 1966. – 376 с.
8. **Леонтьев И.А.** Основы надежности систем добычи газа / И.А. Леонтьев, И.Г. Журавлев. – М.: Недра, 1975. – 201 с.