

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ШТАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ С ЦЕЛЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Дерябин Г.А., Блинов В.Л.

УрФУ, Екатеринбург, Россия

deryabingleb.were@gmail.com, vithomukyn@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе рассматривается создание программного комплекса на языке Python с целью определения, анализа и прогнозирования технического состояния газотурбинной установки. Для оценки технического состояния используется коэффициент технического состояния по мощности, мощность рассчитывается методом энтальпий из параметров центробежного нагнетателя. В работе затронут вопрос фильтрации исходных данных. На примере выгрузки для реальной газотурбинной установки с использованием разработанного программного кода проведен анализ исходных данных, расчет и определение технического состояния с объяснением его изменения. Сформулированы выводы о необходимости использования дополнительных методов определения мощности и требования к полноте исходных данных для достоверного анализа.

Ключевые слова: газотурбинные установки, техническое состояние, параметрическая диагностика, надежность

DATA PROCESSING OF STANDARD MEASURING SYSTEMS OF GAS TURBINE FOR PREDICTING THE TECHNICAL CONDITION

Deryabin G. Blinov V.

UrFU, Ekaterinburg, Russia

Abstract. In this paper, we consider the creation of a software package in the Python language for the purpose of determining, analyzing and predicting the technical state of a gas turbine unit. To assess the technical condition, the technical condition factor for power is used, the power is calculated by the enthalpy method from the parameters of a centrifugal blower. The work touches upon the issue of filtering the source data. On the example of unloading for a real gas turbine plant using the developed program code, the analysis of the initial data, calculation and determination of the technical state with an explanation of its change was carried out. Conclusions are formulated about the need to use additional methods for determining the power and the requirements for the completeness of the initial data for reliable analysis.

Key words. gas turbine, technical condition, parametric diagnostics, reliability

Введение. Газотурбинные установки (ГТУ) – сложное техническое оборудование, эксплуатация которого связана с опасностью для персонала и технологических систем. ГТУ нашли широкое распространение в газотранспортной отрасли и расходуют свыше 5% транспортируемого газа на собственные нужды [1]. Повысить эффективность уже спроектированных ГТУ можно за счет работы на экономичных режимах и в оптимальном техническом состоянии. Увеличение количества ГТУ, числа объектов, отработавших свой нормативный срок службы, приведет к росту объема и важности технической диагностики, предиктивного обслуживания и ремонта. Перспективным с точки зрения экономии ресурсов считается переход с планово-предупредительной системы эксплуатации на эксплуатацию по техническому состоянию – это позволяет сократить затраты на 20% [2]. Для выполнения этих задач необходимо обеспечить максимально энергоэффективную и надежную работу основного оборудования компрессорных станций (КС) – газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Одним из методов является мониторинг и прогнозирование технического состояния (ТС) ГТУ и ее узлов [3].

Для оценки технического состояния ГТУ совместно используют несколько методов: контроль качества масла, вибрационная диагностика, оптический и другие методы контроля состояния деталей проточной части, параметрическая диагностика [4-5]. Тем не менее существует не так много систем и алгоритмов, направленных именно на онлайн мониторинг эффективности и коэффициента деградации эффективности данного оборудования в течение жизненного цикла, систем, которые могли бы оценить влияние технического обслуживания на повышение эффективности, удаленно контролировать динамику изменения ТС, планировать ремонтные работы.

Точное определение мощности – основная задача при оценке ТС по коэффициентам технического состояния (КТС). Основное распространение получил метод определения мощности ГТУ по мощности ЦБН, вычисляемой методом энтальпий [6], этот метод используется в данном исследовании. Существуют методы определения мощности по сдвигу характеристики ГТУ [7], по параметрам силовой турбины [8, 9]. Также мощность ГТУ может быть определена из теплового баланса, составленного для контрольного объема [10]. С использованием данных по изменению КТС ГТУ, а также статистики по дефектам основных узлов ГТУ, можно спрогнозировать вероятное изменение технического состояния установки с течением времени [11].

Целью данной работы является создание программного комплекса для обработки исходных данных, расчета параметров работы газоперекачивающего агрегата (ГПА) и определение технического состояния для его прогнозирования.

Комплекс разработан на языке программирования Python, для анализа используются данные эксплуатации реальной газотурбинной установки приводного типа за календарный год.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования рассмотрена ГТУ для привода центробежного нагнетателя (ЦБН) природного газа. Для анализа использовались параметры работы ЦБН и ГТУ, записанные системой автоматического управления (САУ) агрегата с шагом 2...6 часа в течение 11 месяцев. Информация о причинах и типах остановов, технических обслуживаниях и ремонтах, режимах работы КЦ отсутствует. Исходными данными являлись исключительно числовые значения параметров. Большой шаг между измерениями и неполнота информации снизят точность определения и прогнозирования ТС, однако данные за длительный период времени хранятся в таком виде, в частности по этой причине нужен создаваемый алгоритм. В ходе работы сформулированы требования к полным исходным данным, ведется их сбор.

В качестве критерия технического состояния ГТУ рассматривался коэффициент технического состояния (КТС) по мощности ГТУ, предложенный ВНИИГАЗ и используемый ПАО «Газпром» для оценки энергоэффективности газотранспортных объектов и систем [12]:

$$K_{Ne} = \frac{N_{e0\text{пр}}^{\phi}}{N_{e0}},$$

где N_{e0} – номинальная (паспортная) мощность ГТУ, кВт, $N_{e0\text{пр}}^{\phi}$ – фактическая приведенная мощность ГТУ.

Для определения КТС наиболее важным является достоверная оценка фактической мощности установки. В данной работе для расчета эффективной мощности ГТУ выбрана методика ВНИИГАЗ по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов [6]. Расчет основан на определении потребляемой мощности ЦБН. Напор и КПД ЦБН рассчитываются по методу энтальпий.

Выбранные методы реализованы в виде сочетания табличных данных и программного кода на языке Python 3. Решение использовать язык программирования для реализации алгоритмов было связано с необходимостью обрабатывать большие объемы данных и воспроизводить много раз повторяющиеся циклы, а также в последствии использовать полученные результаты для прогнозирования изменения технического состояния ГТУ. Для создания кода в Python использовались библиотеки: Pandas для организации табличных данных и операций над ними; Matplotlib для визуализации данных и построения графиков; Numpy для математических операций.

В ходе работы для оценки коэффициента технического состояния ГТУ в режиме разработан алгоритм, состоящий из нескольких этапов (рисунок 1).



Рисунок 1 – Этапы разработанного алгоритма

Поскольку техническое состояние ГТУ определяется не по результатам испытаний, как этого требует ГОСТ [13], а по архивным записям, то необходимо осуществлять фильтрацию параметров работы установки для отсева недостоверных и неустановившихся режимов работы, которые отрицательно скажутся на точности получаемых результатов и дальнейшего прогнозирования. Таким образом, третий этап направлен на фильтрацию режимов работы ГПА [14].

На четвертом этапе выполняется расчет параметров работы ГПА и эффективной мощности ГТУ на различных режимах работы в рамках рассматриваемого периода. На пятом этапе осуществляется оценка технического состояния ГТУ по заданным периодам работы (ПР). На заключительном этапе осуществляется анализ полученных результатов, оценка их достоверности и доработка алгоритма и программного кода при необходимости. На этом же этапе проводится прогнозирование технического состояния ГТУ на основании методов математической статистики [15].

Результаты. С применением данного алгоритма проведена оценка технического состояния ГТУ с использованием архивных параметров работы за календарный год, результаты которой показаны на рисунке 2. На графике представлены значения КТС ГТУ, изменяющиеся во времени. На основании анализа полученных данных можно отметить, что техническое состояние ГТУ со временем ухудшается. Однако, следует выделить некоторые периоды, когда техническое состояние изменилось резко. Задачей исследователя в данном случае становится анализ достоверности полученных результатов, а также поиск причин такого характера изменения технического состояния.

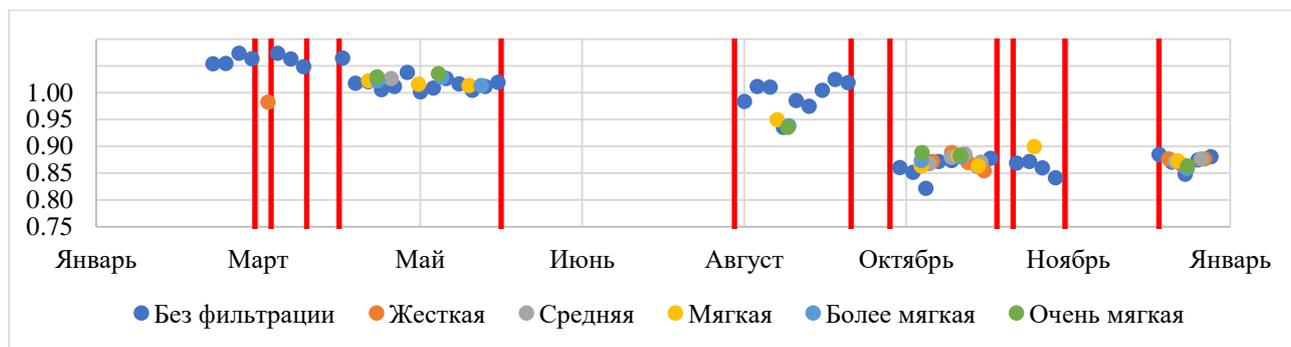


Рисунок 2 – График зависимости КТС от времени и степени фильтрации

Обсуждение. Для визуальной оценки влияния разной степени фильтрации исходных данных на рисунке 2 нанесены значения КТС, отмеченные разным цветом. Из анализа положения точек можно сделать вывод, что для рассматриваемой выборки фильтрация существенно не повлияла на величину КТС, что обусловлено большим интервалом времени между записанными режимами работы ГПА, не позволяющим достоверно определить установившиеся режимы работы, так как набор и сброс мощности ГТУ происходит за несколько секунд, минут.

Выбор типа аппроксимирующей прямой оказывает существенное влияние на величину КТС при его прогнозировании. При линейной экстраполяции на три месяца КТС лежит в пределах 0,790 – 0,835, степенной - 0,80 – 0,84. Для достоверного прогнозирования КТС ГТУ необходимо описать характер распределения полученных точек и выбрать правильный инструмент для прогнозирования значения КТС.

В марте КТС сохранялся на одном уровне, а в течение апреля-мая и августа-сентября снизился на 2%. Можно предположить, что в летний простой никаких работ с ГТУ не проводилось, она стояла по причине смены режима работы компрессорной станции или с целью равномерной наработки других ГТУ, поскольку КТС не изменился. Однако к следующим ПНР значение КТС резко снизилось на 13% и в дальнейшем держалось на уровне 0,87. Можно сделать предположение, что ПНР перед снижением закончился отказом по какой-то причине, которая в дальнейшем повлияла на ТС двигателя, либо такой характер может быть вызван неточностью в исходных данных.

Для объяснения падения технического состояния проведен анализ исходных данных. Сформулированы две гипотезы, объясняющие возможную ошибку в определении КТС: недостоверность определения расхода газа через ЦБН и включение противообледенительной системы (ПОС) ГТУ.

Одновременно с падением КТС отмечено снижение перепада давления на сужающем устройстве ЦБН на 30%, с помощью которого определяется расход газа через ЦБН, и, следовательно, мощность ГТУ. Оценка достоверности

определения расхода определялась путем нанесения фактических рабочих точек ЦБН на его штатную газодинамическую характеристику (рисунок 3).

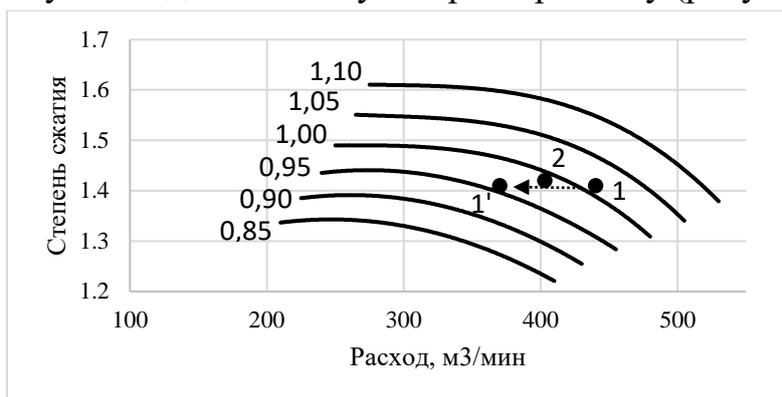


Рисунок 3 – Газодинамическая характеристика нагнетателя с точками режимов

Точка 2 лежит в своей области характеристики, а точка 1 лежит на большей изодроме, точка 1' показывает действительное положение точки. Аналогичный анализ других режимов работы показал, что точки режимов до 28 сентября должны быть смещены влево, то есть провести корректировку расхода. Таким образом установлено, что период до резкого снижения КТС характеризуется завышенным расчетным значением расхода. Это означает, что расход и мощность были завышены, а КТС в действительности не снижался, а был на том же уровне, что также объясняет $KTC > 1$ в первой половине года.

С другой стороны, согласно ГОСТ [13] о порядке проведения испытаний, ПОС в период испытаний должна быть отключена либо учтена в расчетах. Была выдвинута гипотеза, что на падение мощности повлияла работа противообледенительной системы, которая могла бы начаться в период снижения мощности.

Для подтверждения гипотезы о включении ПОС были взяты исторические данные с метеостанции вблизи объекта эксплуатации с целью сравнения реальной температуры атмосферного воздуха с температурой на входе в ГТУ. На основании анализа подтверждено, что в период с октября по декабрь температура на входе в ГТУ превышала атмосферную, что указывает на включенный подогрев воздуха. По статистической информации, включение ПОС снижает мощность ГТУ до 10% [16].

На основании проведенного анализа подтверждены обе гипотезы и в действительности КТС ГТУ за весь календарный год снизился на 10%. Скорректированный график изображен на рисунке 4, при помощи линейной линии тренда, лучше всего описывающей распределение точек, сделан прогноз снижения технического состояния на один месяц.

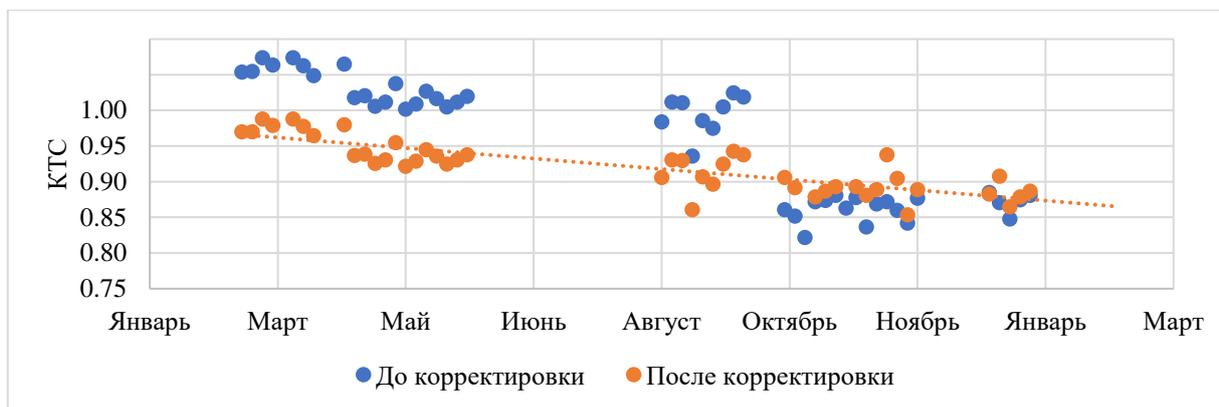


Рисунок 4 – Скорректированный график зависимости КТС от времени

Для перехода к этапу прогнозирования ТС для подготовки данных предлагается использовать описанный алгоритм с дополнением в виде модуля выявления ошибок, возникновение которых требует проведения анализа экспертом.

Заключение. В рамках проведенной работы сделаны следующие основные выводы:

1. Выбраны методики, позволяющие отфильтровать устоявшиеся режимы, описать работу ГПА по штатно-измеряемым параметрам, определить КТС двигателя. При помощи языка программирования Python создан программный комплекс, позволяющий рассчитать мощность, КТС и другие параметры ГПА по штатно-измеряемым параметрам. При помощи программного комплекса проведен анализ годовой выборки данных из архивных записей САУ ГПА.

2. При анализе результатов проведено исследование оптимальных настроек фильтрации для исходного набора данных, зависимость прогнозируемой величины КТС от распределения точек, выбора периода и типа аппроксимирующей прямой. Определены значения КТС, выявлено резкое снижение КТС в рассматриваемой выборке, проведен анализ достоверности полученных данных.

3. Предложен комплекс подготовки штатно-измеряемых параметров ГПА для определения и прогнозирования технического состояния.

4.

Библиографический список

1. Годовой отчет ПАО «Газпром» за 2020 год – режим доступа: <https://www.gazprom.ru/f/posts/57/982072/gazprom-annual-report-2020-ru.pdf> (дата обращения 01.06.2021).

2. Основы надежности газотурбинных двигателей /В.М. Акимов. Москва, 1981.

3. А.З. Шайхутдинов, С.Ф. Жданов, С.Ю. Сальников. Научно-техническая политика ОАО «Газпром» в области газоперекачивающей техники /

Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования – 2010. – С 11-16.

4. Основы надежности и технической диагностики турбомашин: Учебное пособие / Е.В. Урьев. – Екатеринбург: УГТУ, 1996. – 71 с.

5. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т./Ред. совет: В.С. Авдудевский (пред.) и др. – Москва: Машиностроение, 1987 – (В пер.). Т. 9. Техническая диагностика / Под общ. ред. В.В. Ключева, П.П. Пархоменко. – 352 с.

6. ПР 51-31323949-43-99. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов – Москва, ВНИИГАЗ

7. Ванчин А.Г. Экспресс-метод оценки располагаемой мощности ГТУ и коэффициента технического состояния по мощности на основе закономерностей сдвига характеристик ГТУ при изменении ее технического состояния. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2012. №5. С. 287 – 292.

8. Oleg V. Komarov, Viacheslav A. Sedunin, Vitaly L. Blinov, Alexander V. Skorochoodov. Parametrical diagnostics of gas turbine performance on side at gas pumping plants based on standard measurements // ASME Turbo Expo, Dusseldorf, Germany, 16-20 june 2014. – P.1-8.

9. V.L. Blinov, O.V. Komarov, E.A. Zaslavskiy, Estimation of the driven gas turbine unit technical performance using the standard measuring systems, E3S Web of Conferences 178, 01044 (2020)

10. Gas turbines. Test methods. Acceptance tests, ISO/DIS 2314 (2007)

11. Заславский Е. А. Оценка технического состояния газотурбинной установки в составе газоперекачивающего агрегата / Заславский Е. А., Блинов В. Л. // Вестник молодежной науки, 2020.

12. СТО Газпром 2-3.5-113-2007. Методика оценки энергоэффективности газотранспортных объектов и система – Москва: ВНИИГАЗ, 2007.

13. ГОСТ Р 52782-2007. Установки газотурбинные. Методы испытаний. Приемочные испытания – Москва: ЦИАМ, 2008.

14. Якименко И. С. Фильтрация параметров работы газотурбинной установки для оценки ее технического состояния / Якименко И. С., Блинов В. Л // Материалы конференции молодых ученых УралЭНИН, 2018, с. 105-107

15. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / Кобзарь А. И. – Москва, Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2006. – 813 с.

16. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / Зарицкий С.П – Москва: Недра, 1987. – 198 с.