

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОСТРОЕНИЯ СВОДНОЙ ДРОССЕЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А.Р. ЗАГРЕТДИНОВ, Р.И. КАМАЕВ, В.И. КРУГЛОВ, В.Н. ЛОГИНОВ

Казанский государственный энергетический университет

Использование в энергетике газотурбинных установок признается перспективным и получает все большее распространение. Необходимость повышения эффективности их эксплуатации обусловила актуальность проблемы оценки текущего технического состояния. Одним из подходов к решению этой проблемы является метод построения сводной дроссельной характеристики (СДХ), нашедший успешное применение для многих энергетических систем и современных авиационных технологий.

Представлен подход к определению работоспособности газотурбинного двигателя на основе построения СДХ, предложен метод повышения достоверности результатов расчетов. Разработана методика построения доверительных коридоров, основанная на универсальном моделирующем алгоритме, позволяющем определить вид и параметры закона распределения экспериментальных данных в зависимости от конкретных условий испытаний.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, газотурбинная установка, сводная дроссельная характеристика, надежность, оценка технического состояния, работоспособность, контроль качества, доверительный коридор.

СДХ двигателя имеет многофункциональное назначение в условиях серийного производства газотурбинных двигателей (ГТД). Она представляет собой среднестатистическую дроссельную характеристику серийно изготавливаемых двигателей и, как таковая, отражает качество изготовления и сборки ГТД на предприятии за определенный период [1]. К основным функциям СДХ относятся:

- контроль правильности измерения термогазодинамических параметров при стендовых испытаниях и при эксплуатации ГТД;
- использование при оценке и отладке конкретных экземпляров двигателей при стендовых испытаниях;
- оценка разброса характеристик ГТД;
- контроль качества изготовления ГТД;
- оценка влияния конструктивных и технологических мероприятий на уровень термогазодинамических параметров ГТД [2].

Оценка состояния ГТД с помощью СДХ может осуществляться на основе использования результатов измерения параметров некоторой совокупности однотипных двигателей. При этом в оцениваемую группу, как правило, включают двигатели с близкими значениями наработки и находившиеся в сходных условиях эксплуатации. Для новых двигателей используются результаты контроля, например, квартальной группы ГТД. Целью применения такого подхода является построение модели, близкой к средней для исследуемой группы двигателей. Это позволяет получить более достоверные результаты моделирования для конкретного двигателя по сравнению с классическим статистическим подходом без существенного увеличения

экономических и ресурсных расходов на проведение испытаний, необходимых для получения индивидуальных моделей. [3-7]

Групповые модели могут позволить оценить не только тренд параметров состояния, но и дисперсию их значений с требуемой точностью. При этом в практике эксплуатации как основной критерий, характеризующий качество ГТД, часто используется сводная дроссельная характеристика. Например, для двигателей семейства НК-8 разработаны групповые регрессионные модели первого уровня сложности, в которых СДХ строится по двум режимам испытаний.

В настоящее время аппроксимация СДХ осуществляется, как правило, кривой третьего порядка. Однако, когда речь идет о построении СДХ как линии регрессии по случайной совокупности данных, использование полиномов высокой степени представляется затруднительным. Для построения линии регрессии в этой ситуации необходимо располагать совокупностью в несколько тысяч данных. Это объясняется тем, что даже небольшие отклонения коэффициентов при высоких степенях значительно изменяют характер полученной линии регрессии. Применительно к СДХ это означает возможность появления существенных ошибок в оценочных значениях при больших частотах вращения двигателя.

Обычно для построения линии регрессии используется небольшое число данных, поэтому важно использовать статистическую процедуру, которая дает высокую устойчивость оценок, т.е. их повторяемость на нескольких совокупностях. Для этого принято заменять регрессию в виде полинома третьей степени на регрессию, представляющую собой кусочно-линейную кривую.

Она строится последовательно для каждой пары смежных режимов испытания. Уравнение линии регрессии, как правило, представляется в виде

$$Y = a \cdot N + b,$$

где Y – соответствующая СДХ; N – частота вращения ротора низкого давления; a , b – постоянные, полученные в результате оценивания по статистическим данным испытаний.

Кусочно-линейное построение СДХ направлено на определение оценочных значений, когда сдаточные испытания осуществляются всего на двух режимах, и не рекомендуется для ситуации, когда они ведутся на всех режимах, т.к. кусочно-линейная аппроксимация при испытаниях на всех режимах не обеспечивает существенных преимуществ по сравнению с другими методами построения СДХ.

Необходимо отметить также, что выбор вида аппроксимирующего полинома в каждом конкретном случае зависит от опыта исследователя и не свободен от субъективизма. Следовательно, точность и достоверность результатов оценки также могут оказаться не соответствующими реальному состоянию ГТД.

Для оценки разброса характеристик двигателя необходимо определить доверительные интервалы, в которых могут с требуемой гарантией находиться значения рабочих параметров. При использовании с этой целью СДХ, как правило, удастся определить только математическое ожидание оцениваемой характеристики, но не параметры закона ее распределения. Несомненным достоинством СДХ является то, что она позволяет строить не только доверительные интервалы, но и доверительные коридоры во всем диапазоне режимов испытаний. Однако и в этом случае объективно оценить границы коридоров достаточно сложно. Использование на практике нормального закона распределения в ряде случаев не приводит к адекватным результатам. Следовательно, при сравнении доверительных коридоров с коридорами, определяемыми требованиями технических условий (ТУ), можно принять дефектный двигатель за пригодный к эксплуатации, и наоборот.

Таким образом, необходимо включить в модель оценки качества группы ГТД методику, позволяющую объективно оценить границы доверительных коридоров при сравнении их с ТУ для принятия решения о возможности дальнейшего использования двигателей.

Предлагаемый подход к оценке качества группы ГТД может быть сведен к следующей методике [8–9]:

- 20–25% двигателей из оцениваемой группы подвергаются испытаниям на всех рабочих режимах. Для них строится СДХ в соответствии с методом группового учета аргумента (МГУА) [10]. Рассчитанная СДХ является базовой характеристикой для остальных ГТД;

- оставшаяся часть двигателей из группы испытывается на максимальном и номинальном режимах. По результатам этих испытаний строится суммарная СДХ для всей группы на указанных двух режимах. В результате получается некоторое смещение от базовой кривой. Оставшийся участок суммарной СДХ строится эквидистантно базовой характеристике;

- путем сравнения значений суммарной СДХ и результатов испытаний оценивается разброс и рассчитываются доверительные интервалы с заданным уровнем значимости. Если границы доверительного коридора выходят за пределы технических условий (ТУ), то определяется номер двигателя с максимальным отклонением значения дроссельной характеристики от номинального, и расчеты повторяются без учета этого ГТД. Отбракованный двигатель направляется на индивидуальные испытания или на переборку.

На основе предлагаемой методики была разработана математическая модель для оценки качества группы ГТД, которая может быть представлена в виде алгоритма, изображенного на рис. 1 [11].

Блок 1 служит для ввода результатов испытаний оцениваемой группы ГТД.

Блок 2 обеспечивает расчет базовой СДХ.

Блок 3 предназначен для построения суммарной СДХ.

Блок 4 позволяет оценить разброс рассчитанных значений СДХ относительно базовой характеристики и построить доверительные коридоры.

Блок 5 используется для сравнения полученного доверительного коридора с коридором допусков, заданным по ТУ.

В блоках 6 и 7 определяется двигатель с максимальным отклонением измеренных или рассчитанных значений СДХ от ТУ. Данные по этому двигателю исключаются из групповой выборки и расчеты повторяются, начиная с блока 3.

Блок 8 представляет собой личное дело исследуемой группы ГТД. В нем хранятся результаты измерений и расчетов параметров как для всей группы, так и для отдельных двигателей за весь предшествующий период их жизненного цикла. При этом учитываются номера двигателей, подвергшихся испытаниям для построения базовой СДХ, и даты этих испытаний. При очередной оценке качества группы для испытаний на всех основных режимах назначаются двигатели с другими номерами, что позволяет повысить достоверность результатов расчетов.

Блок 9 предназначен для оценки тренда СДХ в допусковом коридоре на основе анализа данных, содержащихся в блоке 8.

Блок 10 служит для вывода информации в удобном для пользователя виде. Информация содержит результаты оценки качества исследуемой группы двигателей, а также рекомендации по дополнительным испытаниям или отбраковке двигателей в случае необходимости.

В соответствии с предложенным алгоритмом была разработана программа для персонального компьютера на языке *Delphi*. Работоспособность предложенной

методики была проверена по результатам испытаний реальных ГТД НК-8-2У [1], явившихся прототипом ГТУ НК-16СТ.

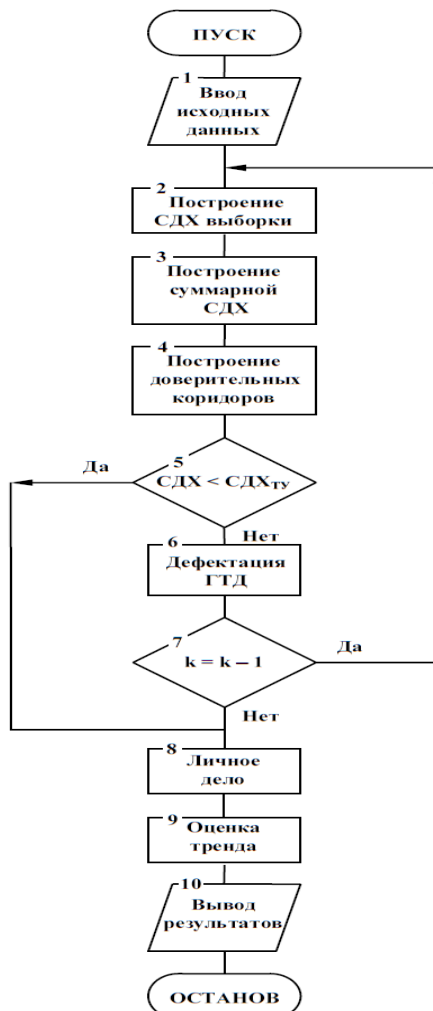


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оценки качества группы ГТД

На рис. 2 показан график СДХ, отражающий зависимость скорости вращения турбины высокого давления ($n_{вд}$) от скорости вращения турбины низкого давления ($n_{нд}$). Линия (1) представляет номинальную характеристику двигателя по требованиям ТУ. Линии (2) и (3) являются граничными для потери работоспособности ГТУ. Линии (4) и (5) построены путем расчета СДХ в ходе эквивалентно-циклических испытаний семнадцати ГТД НК-8-2У на ОАО КПП «Авиамотор» [1].

Полученные результаты хорошо согласуются с заключениями о возможности дальнейшей эксплуатации двигателей.

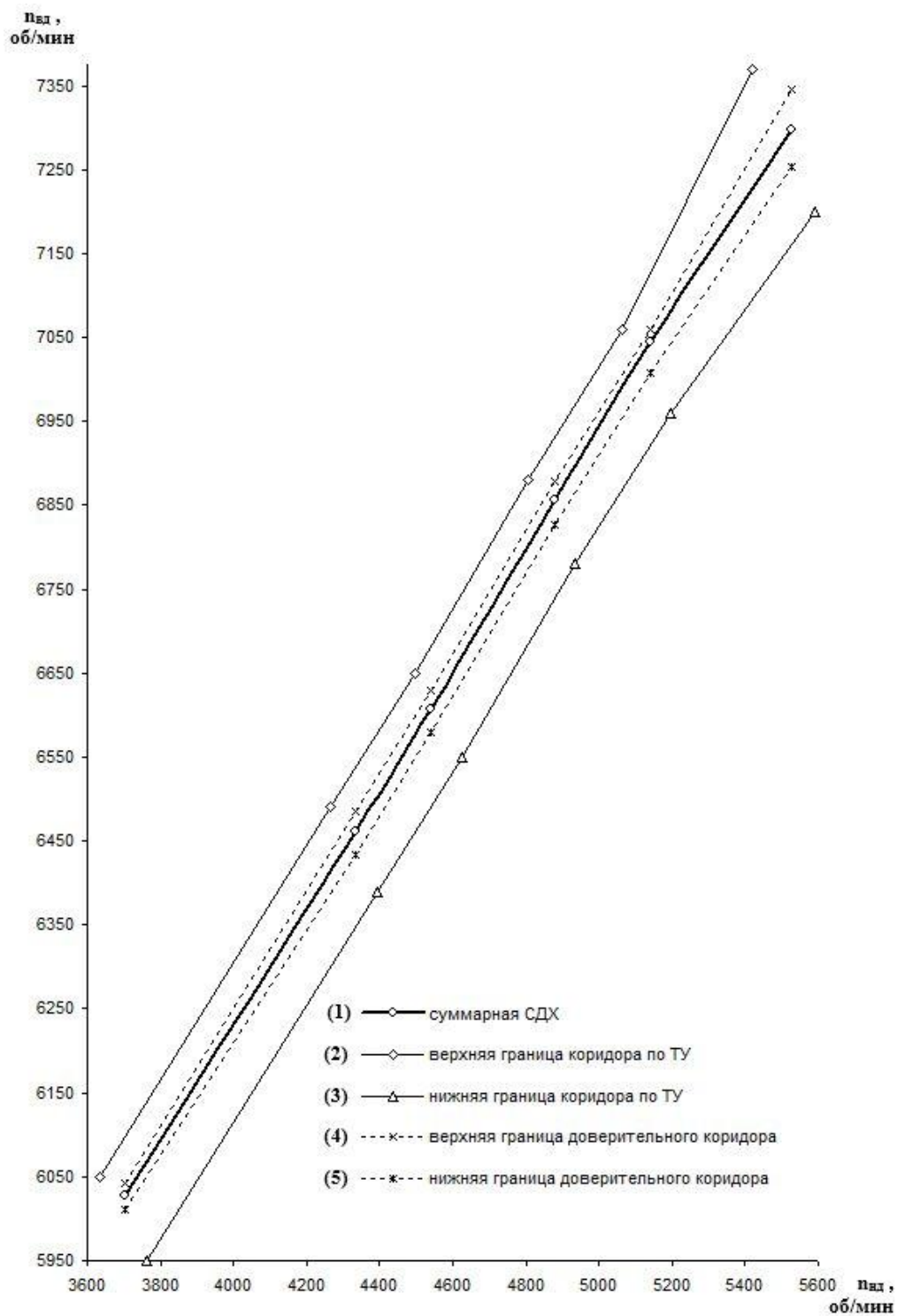


Рис. 2. Суммарная СДХ по частоте вращения турбины высокого давления

Summary

The use of energy of gas turbine units recognized promising and is becoming more common. The need to improve the efficiency of their operation has led to the urgency of the problem assessment of the current technical condition. One approach to solving this problem is the method of construction of the pivot throttle characteristics (SDH), which found successful application in many power devices and has been improved within modern aviation technologies.

The approach to determining the health of gas turbine engine based on the construction of SDH proposed method of increasing the reliability of calculation results. The methodology of trust-building corridors based on the universal modeling algorithm to determine the form and parameters of the distribution law of the experimental data depending on the specific test conditions.

Keywords: *gas turbine engine, the gas turbine plant, pivot throttle characteristics, reliability, evaluation of technical condition, operability, quality control, confidence corridors.*

Литература

1. Симкин Э.Л. Двигатель НК-8-2У. Отладка и оценка параметров на прямо-сдаточных испытаниях с помощью сводной дроссельной характеристики: Методика МТ-0115-90. Казань: КПП "Авиамотор", 1990. 76 с.
2. Holland A.B., Mats E.B., Morozov S.A., Osipov B.M., Timochenko O.I., Tunakov A.P. and Ehrenburg V.N. Program Complex (GRAD) for Computer aided design, development and service operation of gas turbine engines. - China, CADDM, 1992, vol.2, № 1. - p. 68–75.
3. Ахмедзянов Д.А. и др. Разработка методов и средств имитационного моделирования газотурбинных двигателей (и энергетических установок на их основе) и их систем управления с возможностью многокритериальной параметрической оптимизации на этапе функционального проектирования//Молодежный Вестник УГАТУ. 2013. № 1 (6). С.31–41.
4. Сиротин Н.Н. Состояние сложного технического объекта – газотурбинного двигателя, качество функционирования и уровень работоспособности//Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 208. С. 27–31.
5. Акимов В.И. и др. Влияние точности оценки параметров газотурбинного привода на качество определения его технического состояния//Газовая промышленность. 2015. № 10 (729). С. 80–82.
6. Перельштейн Б.Х. и др. Исследование параметров ГТУ НК 16 СТ при дефорсировании//Энергетика Татарстана. 2015. № 1 (37). С. 44–49.
7. Шибанов Г.П. Технология построения дроссельной характеристики опытных газотурбинных двигателей//Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 7. С. 36–40.
8. Круглов В.И. Разработка метода обобщенной оценки технического состояния газотурбинных двигателей. Дис.... канд. техн. наук. Казань, 1994. 186 с.
9. Логинов В.Н., Круглов В.И., Круглов Л.В. Формирование групп для оценки качества локомотивных газотурбинных двигателей // Сборник материалов VIII международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы социально-экономической и экологической безопасности Поволжского региона». 2016. С. 177–178.
10. Логинов В.Н. Разработка математической модели для оценки качества серийных газотурбинных двигателей. Дис.... канд. техн. наук. Казань, 1998. 154 с.
11. Разработка методического и программного обеспечения контроля стабильности качества изготовления серийных ГТД: Отчет о НИР № 3-95-551. Казань: КВАКИУ, 1998. 58 с.

Поступила в редакцию

24 июня 2016 г.

Загреддинов Айрат Рифкатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: (843) 519-42-55.

Камаев Рамил Ирекович – магистрант кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: (843) 519-42-58.

Круглов Вадим Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: (843) 519-42-58.

Логинов Владимир Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: (843) 519-42-55.