

СЕЛЕКТИВНЫЙ ПОДБОР РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ПРИВОДОВ С УЧЕТОМ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

УДК 621.438:622.691.24

П.Г. Романенков, ООО «Газпром трансгаз Уфа» (Уфа, Республика Башкортостан, РФ)

Т.А. Бакиев, д. т. н., ООО «Газпром трансгаз Уфа»

В.И. Акимов, ООО «Газпром трансгаз Уфа», vakimov@ufa-tr.gazprom.ru

О.М. Саубанов, ООО «Газпром трансгаз Уфа»

М.Ю. Егорушков, ПАО «УМПО» НПП «Мотор» (Уфа, Республика Башкортостан, РФ)

В статье исследуется техническое состояние авиационных приводов в составе газоперекачивающих агрегатов технического парка ООО «Газпром трансгаз Уфа». Количество авиационных приводов от общего числа силовых установок ООО «Газпром трансгаз Уфа» составляет 27 %, в масштабе технопарка всего ПАО «Газпром» оно также значительно, в связи с чем результаты исследований авторов статьи имеют особую значимость. В статье сравнивается опыт отечественных и зарубежных турбостроителей, анализируются статистика Международной организации гражданской авиации и конструктивные решения, ориентированные на работу авиационных двигателей в качестве силовых приводов газоперекачивающих агрегатов. На сегодняшний день при проектировании рабочих лопаток турбины высокого давления не учитываются циклические нагрузки на рабочие лопатки, возникающие в результате резонансных явлений с роторами двигателя и навесным оборудованием газоперекачивающих агрегатов. В эксплуатации при пусках, остановках, переходных режимах возможно проявление резонансов, приводящих за счет роста амплитуды колебаний лопаток к появлению дополнительных циклических нагрузок на них и, как следствие, к усталостным трещинам. В статье затронута проблема досрочных съёмов авиационных приводов в составе газоперекачивающих агрегатов в связи с обрывами рабочих лопаток турбин высокого давления. Проанализированы диапазоны частот собственных колебаний лопаток аварийных двигателей, выявлены определенные тенденции, подтверждающие гипотезу возникновения усталостных напряжений в рабочих лопатках из-за резонансных явлений. Обоснован метод селективного подбора лопаток турбин высокого давления с учетом частот собственных колебаний, позволяющий уменьшить вероятность попадания рабочих лопаток в резонанс с оборотными частотами роторов, что приводит к снижению циклической нагрузки резонансного характера и вероятности обрыва рабочих лопаток турбины высокого давления. Таким образом, повышается надежность работы двигателей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АВИАЦИОННЫЙ ПРИВОД, РАБОЧАЯ ЛОПАТКА, ТУРБИНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, РЕЗОНАНС, ВИБРАЦИЯ, ЧАСТОТА СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ.

Авиационные приводы последних поколений различных модификаций составляют 27 % всего парка двигателей газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях (КС) ООО «Газпром трансгаз Уфа». В перспективе при модернизации и обновлении всего парка машин этой дочерней компании ПАО «Газпром» авиационные приводы придут на замену судовым ДР59Л в составе ГПУ-10 «Волна»

в связи с высокой наработкой последних.

В связи с этим по мере увеличения числа приводов авиационного типа ужесточаются требования к обеспечению надежной и эффективной работы, от которой зависит функционирование Единой сети газоснабжения (ЕСГ) региона. Таким образом, вопросы обеспечения надежной, безопасной и безаварийной работы авиационных приводов за период до ка-

питального ремонта (КР), а также увеличение средней наработки на отказ в производственных условиях являются актуальными для Общества.

Десятилетний опыт эксплуатации авиационных приводов показал, что одной из основных причин досрочных съёмов может являться обрыв рабочих лопаток (РЛ) турбины высокого давления (ТВД) при наработке от 1601 до 6523 ч (в среднем около 5000 ч).

Romanenkov P.G., Gazprom transgaz Ufa LLC (Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation)

Bakiev T.A., Doctor of Sciences (Engineering), Gazprom transgaz Ufa LLC

Akimov V.I., Gazprom transgaz Ufa LLC, vakimov@ufa-tr.gazprom.ru

Saubanov O.M., Gazprom transgaz Ufa LLC

Yegorushkov M.Yu., Ufa Engine Industrial Association PJSC, Research and Production Enterprise "Motor" (Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation)

Preassembly selection of the rotor blades of a high-pressure turbine of aviation engines with regard to natural vibration frequencies

The article studies the technical state of aviation engines as part of gas compressor units of the technology park of Gazprom transgaz Ufa LLC. The number of aviation engines of the total number of power units at Gazprom transgaz Ufa LLC is 27 %; this number is also significant on a scale of the whole technology park of Gazprom PJSC, in view of which the research results of the article's authors are of special importance. The article compares the experience of domestic and foreign turbine builders and analyzes the statistics of the International Civil Aviation Organization and design solutions oriented toward the work of aviation engines as power engines of gas compressor units.

Today, the design of the rotor blades of a high-pressure turbine is made without taking into account the cyclic loads on these blades which occur as a result of resonance phenomena in the engine rotors and attachable equipment of gas compressor units. At the starts, stops and transient regimes during operation, the appearance of resonances is possible. The resonances lead to additional cyclic loads, because of increasing of the blade oscillation amplitude, and, as a result, to the emergence of fatigue cracks. The article reviews the problem of the prescheduled dismantling of aviation engines from the gas compressor units that is caused by separations of the rotor blades of high-pressure turbines. The ranges of natural vibration frequencies of the blades of emergency engines were analyzed, and the certain tendencies confirming the hypothesis of the emergence of fatigue stresses in the rotor blades caused by resonance phenomena were revealed. The preassembly selection method of the rotor blades of high-pressure turbines with regard to natural vibration frequencies is substantiated. This method allows reducing the probability of the rotor blades resonating with rotation frequencies of the rotors, that decreases the cyclic load of a resonance nature and the probability of separation of the rotor blades of a high-pressure turbine. The performance reliability of engines is therefore enhanced.

KEYWORDS: AVIATION ENGINE, ROTOR BLADE, HIGH-PRESSURE TURBINE, RESONANCE, VIBRATION, NATURAL VIBRATION FREQUENCY.

В результате каждый такой вылет РЛ приводит к значительным повреждениям газоздушного тракта (ГВТ), потере работоспособности ГПА в целом и, как следствие, к увеличению стоимости и продолжительности восстановительных ремонтов, а также к убыткам от простоя оборудования (рис. 1).

На рис. 1 представлены последствия обрыва всех 90 лопаток ТВД на одном из двигателей. При дефектовке данного двигателя визуально определен усталостный характер разрушений лопаток. Нарботка двигателя на момент разрушения составила 5392 ч.

Стоит отметить, что обрыв лопаток турбин двигателей является проблемой не только для отечественных турбиностроителей. Зарубежные источники свидетельствуют о наличии проблемы обрыва РЛ ТВД двигателей боевых самолетов из-за усталостных напряжений, что приводит к увели-



Рис. 1. Обрыв РЛ ТВД
Fig. 1. Separation of the rotor blades of high-pressure turbines

чению стоимости обслуживания, проблемам безопасности, исходной надежности газотурбинных двигателей (ГТД). Например, в технических источниках 2006 г. [1] приводятся сведения за 1998 г. о том, что, по оценке Воздушных сил США, за год вышли из строя приблизительно 55 % турбодвигателей военных истребителей безопасности класса А (получено более 1 млн долл. США убытков в результате повреждений и простоев самолетов), причем восстановление двигателей в связи с этим составило 30 % от всех затрат на обслуживание.

По данным Международной организации гражданской авиации (ИКАО), по наблюдению за состоянием авиационных ГТД установлено, что наиболее частой причиной отказов является неисправность деталей проточной части двигателя [3]. На долю лопаток приходится около 30 % всех отказов, причем приблизительно 42 % вызваны усталостными разрушениями и еще 33 % – сочетанием малоциклового и многоциклового усталости.

По данным статистики, приведенной в [2], основными причинами не локализованных разрушений от общего числа причин, приводящих к разрушениям, являются: 18,9 % – многоцикловая усталость; 10,2 % – трение ротора о статор; 9,1 % – дефекты материалов; 5,5 % – перегрев, малоцикловая усталость и повреждение посторонними предметами; 5 % – производственные дефекты и разрушение болтов крепления.

Таким образом, можно сказать, что 24 % авиационных двигателей, установленных на летательных аппаратах, имеют дефекты по причинам малоцикловой и многоцикловой усталости. Если рассматривать авиационные приводы наземного исполнения, применяемые на компрессорных ГПА, статистика значительно хуже. При этом в технической литературе отсутствуют сведения о влиянии конструктивного исполнения входного и выходного трактов ГПА на цикловую нагруженность.

Из других технических источников [3, 4] известно, что при условии появления соответствующих напряжений усталостные разрушения РЛ сопровождаются накоплением межкристаллитных трещин и изменением свойств металла в связи с циклической и термической нагруженностью, причем отличие расчетных значений от экспериментальных может достигать 20 % [3].

Обрыв РЛ ТВД при наработке ниже ресурсной, как правило, носит лавинообразный и внезапный характер. Выявить предпосылки зарождения и развития деградиционных процессов, возникающих на РЛ, спектральным анализом виброприборами достаточно сложно. В условиях большого числа гармоник от различных источников корпусной вибрации практически невозможно выявить дефектную частоту и амплитуду лопатки, в которой появились трещина или иные проявления усталостного напряжения. Обнаружить трещину представляется возможным только при эндоскопии проточной части ТВД агрегата, находящегося в резерве, что в условиях эксплуатации и плановой наработки маловероятно. Причем, как показали анализы причин аварийных отказов (АО) агрегатов с обрывами РЛ ТВД, на мощностных показателях работы агрегата усталостные напряжения РЛ ТВД до момента обрыва никак не сказывались. Расширенное виброобследование двигателей

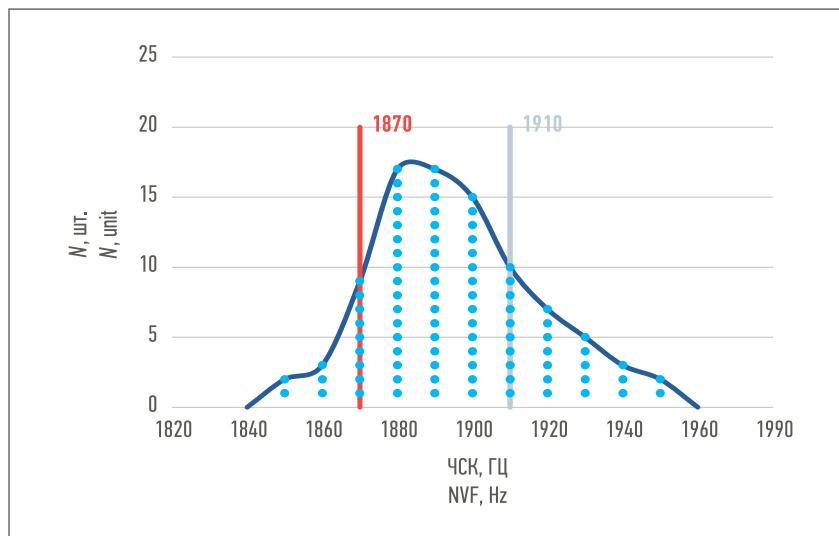


Рис. 2. Распределение ЧСК ТВД:

N – число лопаток с одинаковым значением ЧСК; 1870–1910 Гц – зона эксплуатационных режимов ТВД

Fig. 2. Distribution of the natural vibration frequency (NVF) of high-pressure turbines: N – number of blades with the same value of natural vibration frequency; 1,870–1,910 Hz – operating condition area of high-pressure turbines

накануне АО, включающее спектральный анализ вибросигналов с точек, расположенных на газогенераторе (ГГ) и силовой турбине (СТ), в трех направлениях в целях обнаружения деградиционных процессов также не дает результатов. Какие-либо амплитудные зависимости от всплесков лопаточных частот в диапазоне оборотов ТВД не обнаружены [5].

Соответственно, можно предположить, что на лопатки турбин циклично воздействуют нерасчетные нагрузки, которые не учитываются расчетами и приводят к усталостным разрушениям.

Известно, что при проектировании РЛ ТВД рассчитываются механические, термические, газодинамические, вибрационные нагрузки, принимается во внимание эксплуатационная дегградация металла и ряд других условий и параметров. Однако при таком комплексном подходе проблема обрыва лопаток на «приземленных» авиационных проводах остается острой.

При этом в процессе проектирования РЛ отсутствует учет вероятных циклических нагрузок на РЛ, возникающих в результате

резонансных явлений от вращающегося ротора на переходных режимах, отсутствует как таковой учет резонанса навесного оборудования.

Как известно, в технике при резонансе возрастает амплитуда колебаний, в данном случае РЛ, как следствие становятся значимыми циклические нагрузки, что приводит к нерасчетным нагрузкам и способствует появлению усталостных трещин.

Безусловно, дополнительное циклическое нагружение вследствие резонанса лопаток вносит существенный вклад в усталостные разрушения РЛ. Однако на сегодняшний день нет вероятностной методики оценки возможного влияния резонансных нагрузок на лопатки, а также степени его вклада в усталостные разрушения.

По мнению авторов, для уменьшения вероятности попадания РЛ ТВД в резонанс в условиях эксплуатации имеется возможность перед динамической балансировкой ротора при развесовке по массе РЛ и их сборке на ротор дополнительно учитывать такой фактор, как частота собственных колебаний (ЧСК) РЛ.

В целях анализа степени влияния ЧСК РЛ ТВД на резонансные явления, возникающие в двигателях, была собрана статистика ЧСК РЛ ТВД на одном из авиационных двигателей. Результаты распределения ЧСК лопаток ТВД с учетом эксплуатационных режимов работы турбины представлены на рис. 2, из которого видно, что плотность распределения ЧСК совпадает с функцией Гаусса в виде стандартного нормального статистического распределения.

Таким образом, функцию плотности вероятности попадания ЧСК в область частоты вращения ТВД можно описать выражением:

$$F(\vartheta_{\text{чск}}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\vartheta_i - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где $\mu = 0$ – математическое ожидание при нормальном распределении; $\sigma^2 = 1$ – дисперсия при нормальном распределении; ϑ_i – частота собственных колебаний

i -й лопатки; $e = 2,718$ – основание натурального логарифма.

Отсюда получаем, что распределение ЧСК исследуемых РЛ ТВД подчиняется функции:

$$F(\vartheta_{\text{чск}}) = \frac{1}{2,5} 2,718^{-\frac{(\vartheta_i)^2}{2}}. \quad (2)$$

Из представленного на рис. 2 выделенного диапазона резонансных ЧСК видно, что существенная часть лопаток может испытывать дополнительную циклическую нагрузку от резонансных явлений, увеличивая вероятность обрыва вследствие усталостных напряжений. Логично предположить, что в случае резонанса чем большее число лопаток с ЧСК будет расположено в рабочей зоне вращения турбины, тем больше по амплитуде проявится резонансная реакция, соответственно, лопатки испытают дополнительное нерасчетное нагружение, которое не учитывается

проектами. Кроме того, уместно предположить, что чем шире диапазон частот комплекта РЛ ТВД, тем ниже плотность резонансной области частот, т. е. меньше число РЛ войдет в резонансную область, и наоборот, при сужении диапазона ЧСК комплекта РЛ ТВД все лопатки могут войти в резонансную область.

Для подтверждения влияния резонансов на работоспособность РЛ турбин в эксплуатации была собрана и проанализирована статистика ЧСК лопаток турбин, досрочно снятых по причине их обрыва (рис. 3). На данном графике представлена зависимость диапазонов ЧСК лопаток аварийных турбин от наработки до обрыва.

Из графика можно сделать выводы, что РЛ с диапазоном собственных частот, максимально приближенным к зоне эксплуатационных режимов, больше подвержены дополнительным циклическим нагрузкам резонансными явлениями.



V Международная конференция

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



Представители государственных органов, руководители, специалисты и деловые партнеры нефтегазовых компаний, представители российской науки обсудят актуальные вопросы обеспечения экологической и промышленной безопасности, энергоэффективности, охраны труда.

Программа конференции включает Пленарное заседание и Панельные дискуссии:

- Изменение климата: антропогенный прессинг или природный процесс.
- Переход на наилучшие доступные технологии: первые результаты и перспективы.
- Инновационное развитие отрасли – вектор на энергоэффективность и экологичность.
- Повышение энергоэффективности технологических производств – плюсы и минусы для нефтегазовых компаний.
- Управление профессиональными рисками как часть системы управления охраной труда.

Дата проведения конференции: 5–6 декабря 2017 г.

Место проведения конференции: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Россия, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, п. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, владение 15, стр. 1.

Контактная информация:

Тел.: +7 (498) 657-46-66, факс: +7 (498) 657-44-21
e-mail: esgi2017@vniigaz.gazprom.ru <http://vniigaz.gazprom.ru/events/2017/esgi2017/>



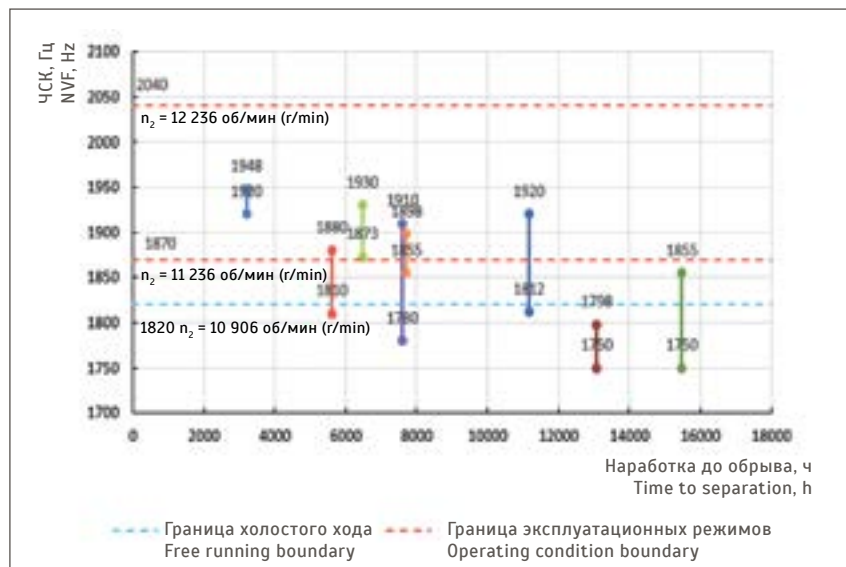


Рис. 3. ЧСК РЛ ТВ досрочно снятых двигателей авиационного типа, эксплуатируемых Обществом

Fig. 3. Natural vibration frequencies of the rotor blades of high-pressure turbines of the aviation engines dismantled ahead of schedule, operated by the company

нансного характера, что свидетельствует о ранних обрывах лопаток по наработке, не превышающей 8000 ч. Соответственно, лопатки с диапазоном частот, максимально отдаленным от опасной зоны (рис. 3), эксплуатируются дольше с наработкой до обрыва, превышающей 14 тыс. ч.

Стоит также учитывать циклические нагрузки в момент пуска и останова, что моментно увеличивает вибрационные нагрузки как на РЛ, так и на весь газогенератор в целом, уменьшая тем самым ресурс лопаток.

Для исключения влияния резонансной циклической нагруз-

ки авторами предложен способ селективного подбора РЛ ТВД по собственным частотам в момент их развесовки по массе при сборке ротора с соблюдением условий, обеспечивающих снижение вероятности попадания РЛ в резонанс. Тем самым обеспечиваются повышение надежности работы двигателя, его наработка.

Первым условием является расширение границ диапазона частот комплекта лопаток для снижения плотности распределения нахождения в резонансных зонах. Другим условием является проведение подбора по синусоидальному распределению плотности и уходу

от математического распределения плотности, ограниченной кривой Гаусса. Примеры плотности таких распределений могут иметь следующий вид:

$$\rho(\vartheta_{\text{ЧСК}}) = \text{const}, \quad (3)$$

$$\rho(\vartheta_{\text{ЧСК}}) = AD\sin(B\vartheta + C), \quad (4)$$

где A – среднее значение ЧСК всех РЛ ТВД; D – амплитуда выборки лопаток; B – число витков кривой плотности распределения ЧСК; ϑ – частота собственных колебаний лопатки; C – сдвиг кривой распределения плотности.

Возможен также выбор прямой зависимости распределения плотности, однако в условиях изготовителя обеспечить такое распределение технологически сложнее.

Таким образом, используя данную технологию селективного подбора РЛ ТВД, а также компрессоров, можно исключить резонансные влияния на их работоспособность, создать эффект частотного взаимного гашения вибрации лопаток за счет закономерного распределения ЧСК, уменьшить корпусную вибрацию, повысить наработку на отказ двигателей.

Разработанные научные основы методики подбора РЛ по ЧСК можно также применять на всех видах приводов стационарного и судового типов, поскольку проблемы обрыва РЛ турбин и компрессоров для них также актуальны. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Castanier M.P., Arbor A., Pierre C. Modeling and Analysis of Mistuned Bladed Disk Vibration: Status and Emerging Directions. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, Vol. 22, No. 2, P. 384–396.
2. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А., Попов В.Г. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. М.: Высшая школа, 2002. 355 с.
3. Михайлов А.Л. Принципы проектирования и вибродиагностика деталей ГТД на основе математического моделирования объемного напряженно-деформированного состояния: дисс. ... д-ра техн. наук. Рыбинск, 2003. 309 с.
4. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: Учеб. пособие. М.: Наука, 1986. 560 с.
5. Акимов В.И., Бакиев Т.А., Скрынников С.В. Опыт исследования надежности ГПА-16Р «Уфа» с применением методов вибродиагностического контроля газотурбинного привода АЛ-31СТН // Газовая промышленность. 2014. № 9. С. 76–79.

REFERENCES

1. Castanier M.P., Arbor A., Pierre C. Modeling and Analysis of Mistuned Bladed Disk Vibration: Status and Emerging Directions. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, Vol. 22, No. 2, P. 384–396.
2. Eliseev Yu.S., Krymov V.V., Malinovsky K.A., Popov V.G. Practice of Operation, Diagnostics and Repair of Gas Turbine Engines. Guidebook. Moscow, Higher School, 2002, 355 p. (In Russian)
3. Mikhaylov A.L. Design Principles and Vibration-Based Diagnostics of the Details of a Gas Turbine Engine Based upon Mathematical Modeling of the Volumetric Stress-Strain State. Doctoral Thesis in Engineering Sciences. Rybinsk, 2003, 309 p. (In Russian)
4. Birger I.A., Mavlyutov R.R. Strength of Materials. Guidebook. Moscow, Nauka, 1986, 560 p. (In Russian)
5. Akimov V.I., Bakiev T.A., Skrynnikov S.V. Experience of Studying the Reliability of the Gas Compressor Unit GPA-16R "Ufa" with the Use of the Methods of Vibration-Based Diagnostics of the Gas Turbine Engine AL-31STN. *Gazovaya Promyshlennost' = Gas Industry*, 2014, No. 9, P. 76–79. (In Russian)