

УДК 621.44.533.697

В.М. ЛАПОТКО, Ю.П. КУХТИН

*ГП «Ивченко-Прогресс», Украина
(Запорожье, E-mail: 03504@ivchenko-progress.com)*

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОСЛАБЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТВД, ОБУСЛОВЛЕННОГО НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ

Результаты расчетов, представленных в данной работе, показывают, что спектр нестационарных сил, действующих на профили лопаток рабочего колеса ТВД, содержит гармоники, обусловленные окружной неравномерностью камеры сгорания по температуре. Допуская совпадение собственных частот колебаний и частот возбуждающих сил, делается анализ возможности ослабления резонансного режима работы рабочей лопатки путем изменения поля температур на входе в ТВД.

резонансные колебания, собственная частота, спектр возбуждающих сил, нестационарное течение, камера сгорания, температурная неравномерность, рабочая лопатка, лагранжевы сетки

Введение

Рабочие лопатки турбомашин создают таким образом, чтобы отстроиться от всех резонансных частот. Однако это весьма трудно, а иногда и невыполнимо, так как спектр собственных частот может быть достаточно густым, а диапазон рабочих оборотов ротора является достаточно широким. В связи с этим приходится допускать работу лопаток в резонансе при снижении уровня возбуждающих сил [1].

Переменные во времени возбуждающие силы для рабочей лопатки ТВД обусловлены нестационарным взаимодействием с рядом стоящими сопловыми лопатками, а также с переменным в окружном направлении полем температур газа на выходе из камеры сгорания [2].

В настоящее время известны различные методы снижения возбуждающих сил, действующих на рабочие лопатки. Интерес представляет комплексный подход ослабления резонансных режимов при сохранении достигнутого аэродинамического качества конструкции.

В связи с этим, проведенные исследования влияния окружной неравномерности камеры сгорания по

температуре на спектр возбуждающих сил рабочей лопатки являются актуальными.

1. Предмет исследования

Предметом исследования, результаты которого представлены в данной работе, являлась экспериментальная турбина высокого давления с заданной на входе в СА синусоидальной окружной неравномерностью КС по температуре (рис. 1).

Газодинамические параметры рассматриваемого узла, были следующие: $n = 800,0$ об/сек; $P^* = 700000$ Па; $P_2 = 205000$ Па; $T_2 = 1100$ К; $\alpha = 0,0$; $\kappa = 1,33$; $R = 287$ Дж/кг·К. Число Рейнольдса, определенное по осевой протяженности расчетной области, скорости звука $\sqrt{RT_2}$, физической вязкости среды на выходе из ТВД, составило 610000,0.

Для того, чтобы оценить степень влияния окружной неравномерности КС по температуре на нестационарную нагрузку рабочих лопаток, были проведены 2-d расчеты нестационарных течений в турбине ТВД с различными эпюрами полной температуры на входе в расчетную область (рис. 2):

– для идеальной эпюры КС по температуре, ха-

рактерно постоянство температуры газа: $T^* = 1450 \text{ K}$;

– исходная, синусоидальная эпюра температур могла быть получена на КС, имеющей 12 горелок.

Амплитуда такой синусоиды составила 200 K;

– окружная эпюра температур с провалом температуры газа в одном из окружных положений (изображено штриховой линией на рис. 2) отображала ситуацию с отказом одной из горелок КС;

– синусоидальная эпюра температур с амплитудой 400 K отображает возможность работы форсунок КС с уменьшенным углом распыла топлива (изображена серой линией на рис. 2).

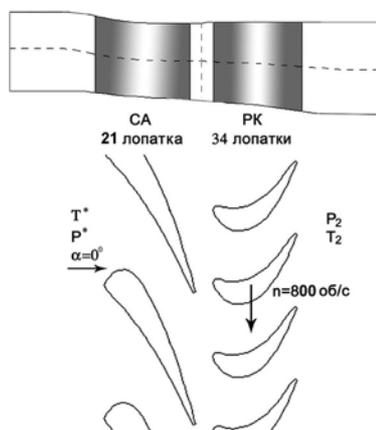


Рис. 1. Конфигурация тракта и фрагмент развертки срединной поверхности тока

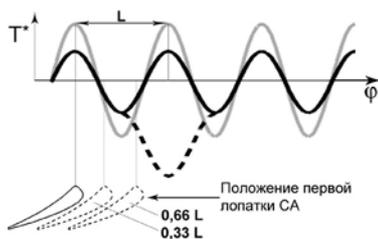


Рис. 2. Моделирование неравномерности поля полной температуры за камерой сгорания

Для оценки степени комплексного влияния КС и соплового аппарата на нагрузку рабочих лопаток, были проведены 2-d расчеты нестационарных течений в турбине ТВД с различной окружной ориентацией соплового аппарата и КС. Величина окружного сдвига соплового аппарата составила 0,33 от окружного шага эпюры температур.

2. Выбор метода исследования

Особенностью проектирования узлов турбомашин является многовариантность объекта проектирования. Это влечет за собой необходимость проведения множества газодинамических расчетов при ограниченном времени проектирования.

Учитывая широкий диапазон исследуемого времени – требуется проводить аэродинамический расчет системы двух венцов с неравномерным полем температур на входе в расчетную область в течение нескольких (>2-х) оборотов ротора, все исследования проводились моделированием 2-d нестационарного течения вязкого газа в слое переменной толщины на переменном радиусе. В качестве инструмента исследования таких течений использовался метод отслеживания струй тока (МОСТ), [3]. В основу этого метода положено численное решение с помощью консервативной разностной схемы нестационарных уравнений, записанных в виде законов сохранения для вязкого теплопроводного газа [4].

Отличительной чертой используемой разностной схемы является использование подвижных, так называемых, лагранжевых сеток. Лагранжевые сетки – это ориентированные в направлении течения бесконечно тонкие, невесомые и непроницаемые для основного потока поверхности. Такие поверхности являются проницаемыми лишь для молей среды, имитирующих диффузию, обусловленную физической вязкостью и турбулентным движением среды.

Как указывалось, существенной особенностью рассматриваемой задачи являлось наличие окружной неравномерности камеры сгорания по температуре. Это означает, что при решении поставленной задачи в расчетной области необходимо в любой момент времени сохранить довольно резкие границы раздела между зонами с различной температурой и плотностью, причем рабочая среда взаимодействует через эти границы. В эйлеровых расчетах такие границы оказываются «размазанными» на несколько ячеек из-за численной диффузии. Такое нефизичное

«мазание» зон с различной температурой и плотностью неприемлемо в поставленной задаче и требует лагранжева описания.

Используемый подход позволил устранить также негативный эффект – «мазание» параметров на линиях стыковки сеток. Это особенно важно при исследовании нестационарных течений в турбомашинах, где наряду с потенциальной неоднородностью поля параметров, присутствует не менее интенсивная следовая неравномерность параметров.

Хорошо адаптированный для расчета нестационарных течений газа в решетках турбомашин этот метод позволяет проводить интегрирование исходной системы уравнений в единой (как в абсолютной, так и в относительной) системе координат для всех взаимодействующих решеток.

3. Обсуждение результатов расчета

Исследования проводились в абсолютной системе координат, связанной со статором. Расчетная область состояла из двух полных лопаточных венцов. Все параметры течения приводились к безразмерному виду. В качестве эталонов давления и температуры принимались параметры P_2 и T_2 на выходе из турбины. Эталоном скорости служила изотермическая скорость звука, определенная также по параметрам на выходе из турбины. За единицу длины принималась осевая протяженность расчетной области: 70,0 мм.

В каждом из исследуемых случаев, после достижения режима установления течения, были получены нестационарные поля параметров, характеризующие течения газа в двух венцах взаимодействующих друг с другом и с окружающей температурной неравномерностью камеры сгорания. Фрагменты мгновенных полей числа Маха, полной температуры, статической температуры, параметра энтропии, полученные при исходной синусоидальной эпюре температур на выходе из КС, представлены на рис. 3 – 6.

Параметры нестационарного нагружения рабо-

чей лопатки, полученные из расчета нестационарного течения в ТВД при отсутствии неравномерности КС по температуре представлены на рис. 7, 8.

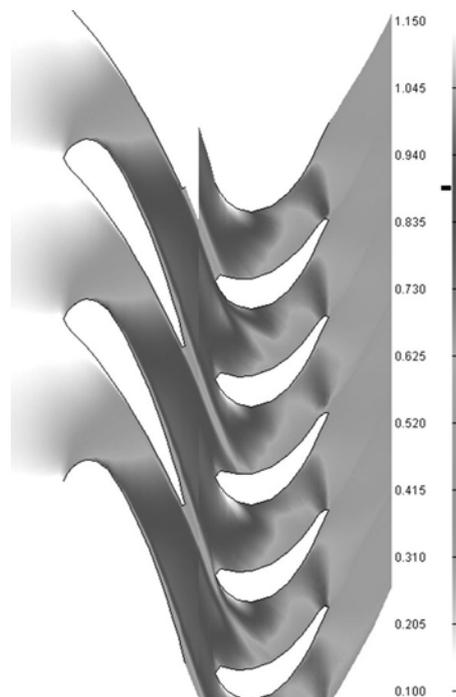


Рис. 3. Фрагмент мгновенного поля числа М в турбине ТВД при исходной синусоидальной эпюре температур на выходе из КС

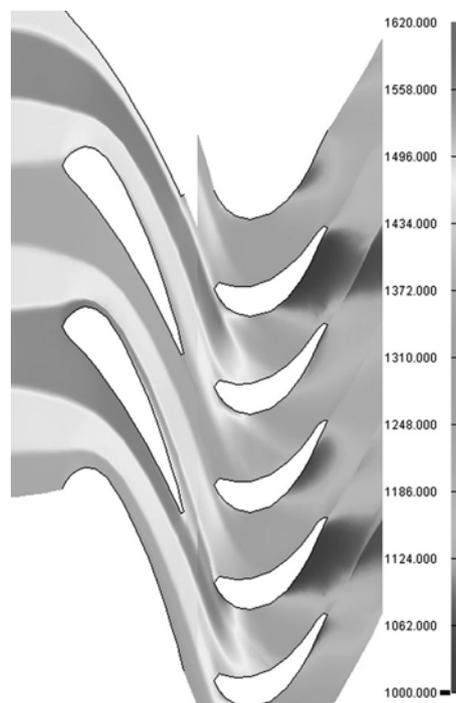


Рис. 4. Фрагмент мгновенного поля полной температуры в турбине ТВД при исходной синусоидальной эпюре температур на выходе из КС

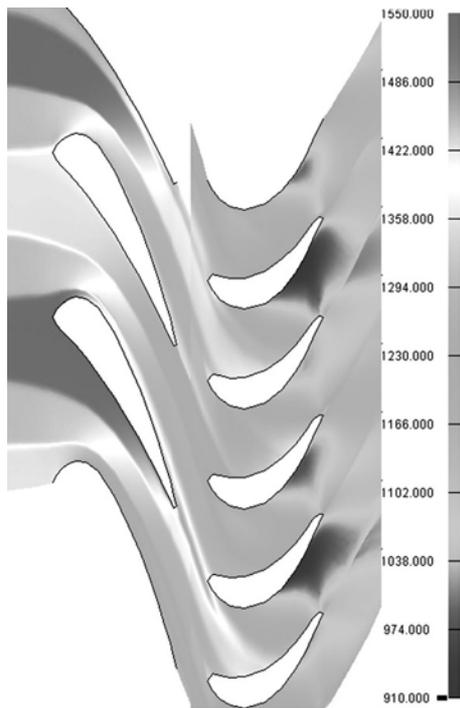


Рис. 5. Фрагмент мгновенного поля статической температуры в турбине ТВД при исходной синусоидальной эпюре температур на выходе из КС

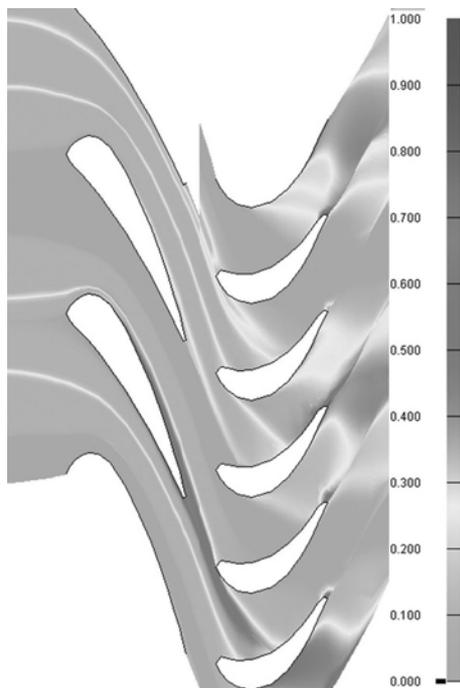


Рис. 6. Фрагмент мгновенного поля энтропии среды в турбине ТВД при исходной синусоидальной эпюре температур на выходе из КС

Динамическое нагружение рабочей лопатки характеризуется в этом случае присутствием гармоник, обусловленных лишь вышерасположенными

лопатками СА (рис. 8).

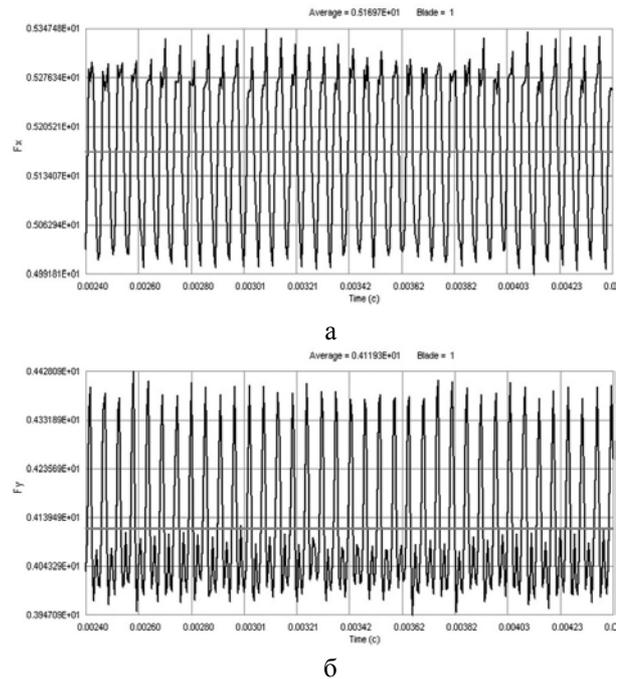


Рис. 7. Эпюры возбуждающих сил, приложенных к перу рабочей лопатки при отсутствии неравномерности КС по температуре ($T^* = 1450\text{K} = \text{const}$):

- а – осевая составляющая;
- б – окружная составляющая

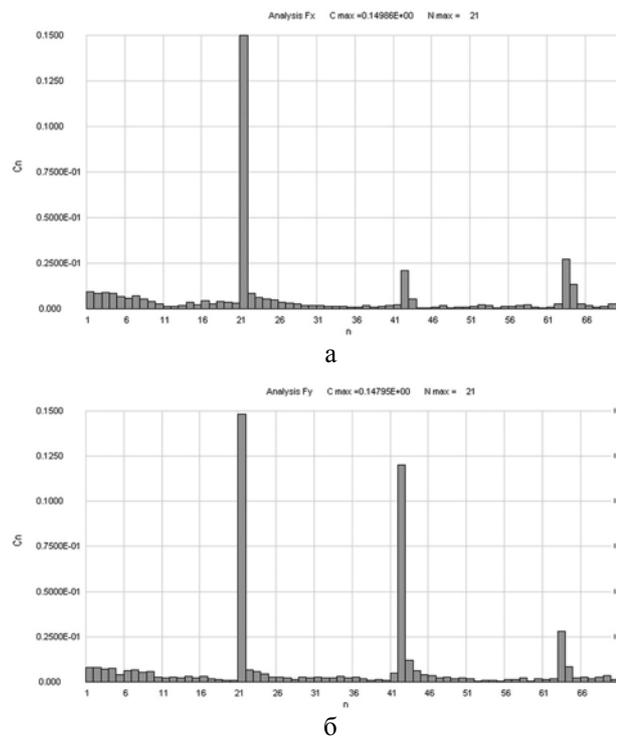


Рис. 8. Спектральная характеристика нестационарных сил, действующих на лопатки РК при отсутствии неравномерности КС по температуре:

- а – осевая составляющая;
- б – окружная составляющая

На рис. 9 представлены графики возбуждающих сил, приложенных к перу рабочей лопатки, полученных при исходной синусоидальной эпюре температур КС на входе в расчетную область.

Результаты анализа спектрограмм нестационарных сил, действующих на рабочие лопатки (рис. 10), показали, что наряду с составляющими гармониками на основной следовой частоте вышестоящего соплового аппарата $n \cdot Z_1$, присутствуют также составляющие $n \cdot Z_\phi$, обусловленные окружной неравномерностью КС по температуре. Здесь: n – частота вращения ротора; $Z_1 = 21$ – количество лопаток СА; $Z_\phi = 12$ – количество форсунок.

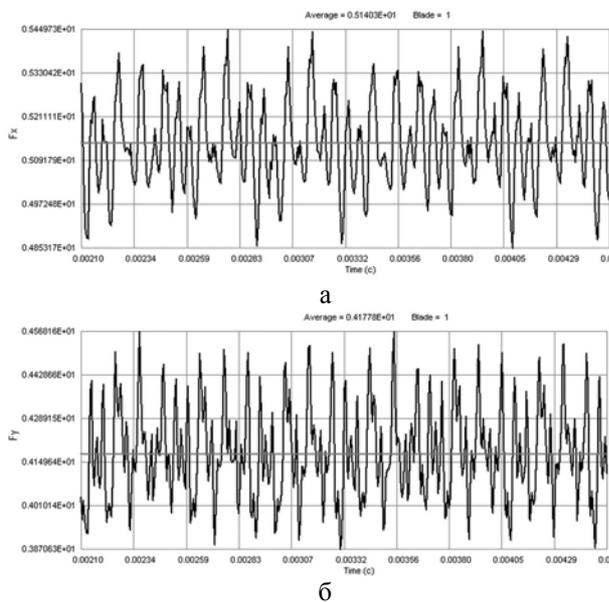


Рис. 9. Эпюры возбуждающих сил, приложенных к перу рабочей лопатки для синусоидальной эпюры неравномерности КС по температуре:

- а – осевая составляющая;
- б – окружная составляющая

Ниже, на рис. 11, представлены эпюры нестационарных сил, действующих на лопатку РК при неравномерности КС по температуре, которая имитировала отказ одной из горелок (зона А на рис. 11). Однако, такой режим работы камеры сгорания благоприятно сказывается на спектральных характеристиках возбуждающих сил (рис. 12), приложенных к лопаткам РК, когда речь идет об ослаблении 12-й гармоники.

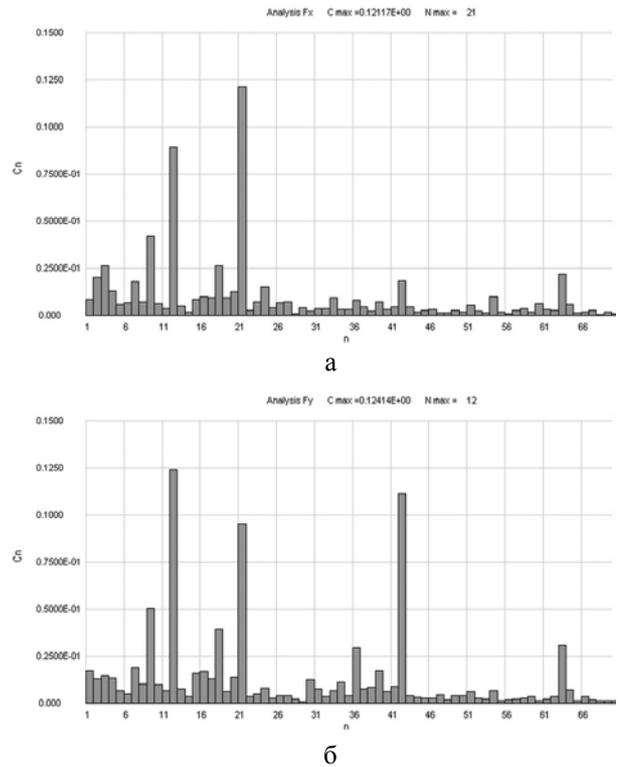


Рис. 10. Спектральная характеристика нестационарных сил, действующих на лопатки рабочего колеса для синусоидальной эпюры неравномерности КС по температуре:

- а – осевая составляющая;
- б – окружная составляющая

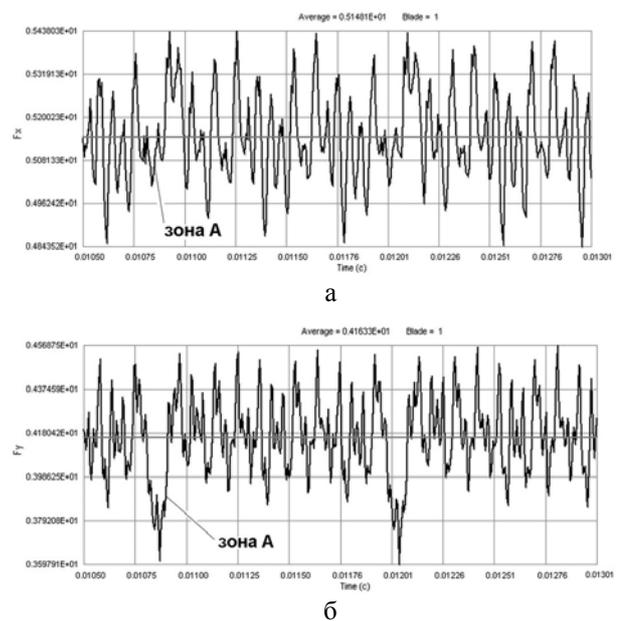


Рис. 11. Эпюры возбуждающих сил, приложенных к перу рабочей лопатки для неравномерности КС по температуре, имитирующей отказ одной из горелок камеры сгорания:

- а – осевая составляющая;
- б – окружная составляющая

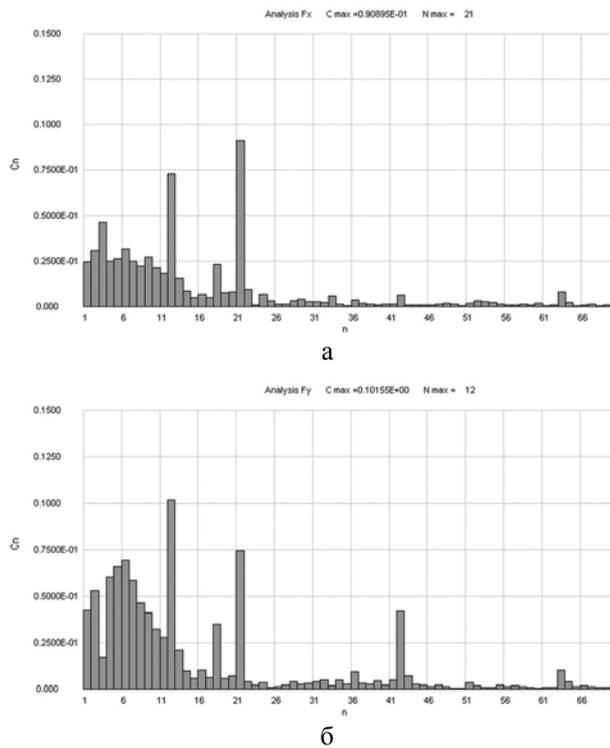


Рис. 12. Спектральная характеристика нестационарных сил, действующих на лопатки РК для неравномерности по температуре, имитирующей отказ одной из горелок камеры сгорания:

- а – осевая составляющая;
- б – окружная составляющая

Эпюры возбуждающих сил рабочей лопатки, полученные из расчета нестационарного течения в ТВД для неравномерности КС по температуре, имитирующей работу форсунок при меньшем угле распыла топлива, представлены на рис. 13.

Спектральная характеристика полученных нестационарных сил (рис. 14) характеризуется не только возрастанием мощности гармоник от камеры сгорания, но и существенным возрастанием мощности гармоник от соплового аппарата ступени, что свидетельствует о существовании нелинейной газодинамической связи в рассматриваемой задаче.

Анализ спектральных характеристик, представленных на рис. 14 – 16, свидетельствует о том, что существует оптимальное окружное положение СА относительно неравномерности камеры сгорания, обеспечивающее ослабление мощности гармоник нестационарных сил, приложенных к лопаткам рабочего колеса.

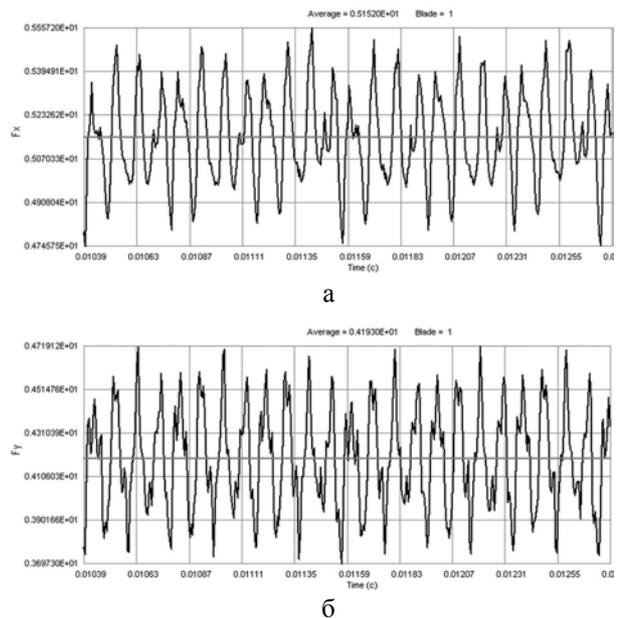


Рис. 13. Эпюры возбуждающих сил, приложенных к перу рабочей лопатки для синусоидальной эпюры неравномерности КС по температуре при уменьшении форсунками угла распыла топлива:

- а – осевая составляющая;
- б – окружная составляющая

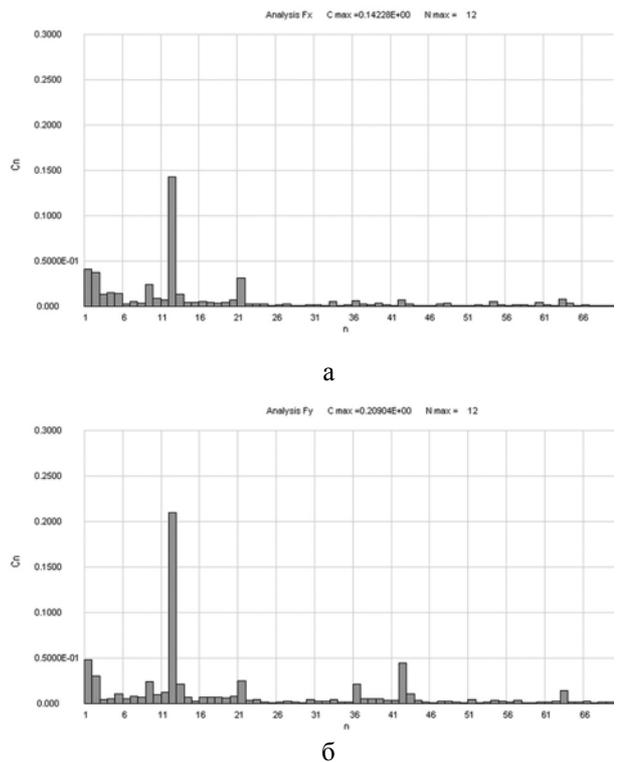


Рис. 14. Спектральная характеристика возбуждающих сил, действующих на лопатки РК для синусоидальной неравномерности КС по температуре при уменьшении угла распыла топлива (исходное окружное положение СА):

- а – осевая составляющая;
- б – окружная составляющая

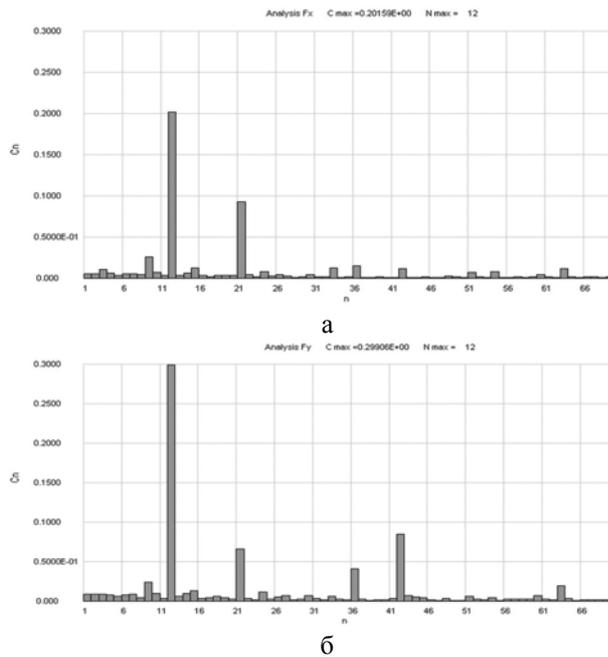


Рис. 15. Спектральная характеристика возбуждающих сил, действующих на лопатки РК для синусоидальной неравномерности КС по температуре при уменьшении форсунками угла распыла топлива в окружном положении СА $t = 0,33$ Тф:
а – осевая составляющая; б – окружная составляющая

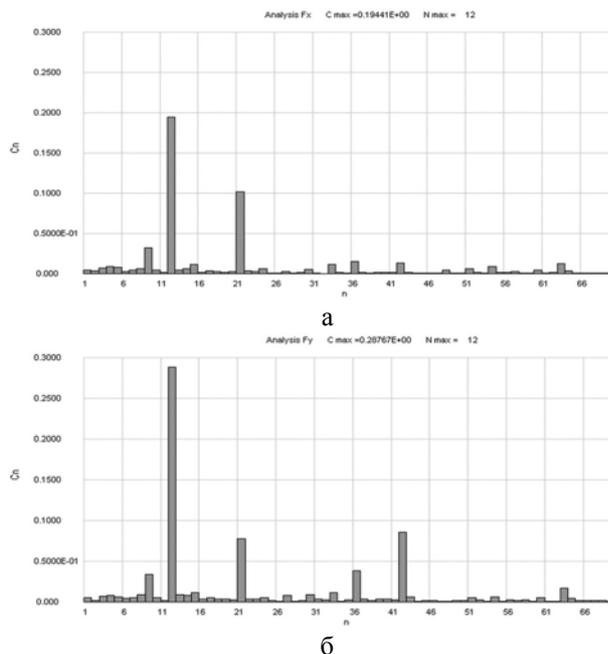


Рис. 16. Спектральная характеристика нестационарных сил, действующих на лопатки РК для синусоидальной неравномерности КС по температуре при уменьшении форсунками угла распыла топлива в окружном положении СА $t = 0,66$ Тф:
а – осевая составляющая; б – окружная составляющая

Выводы

1. При проектировании узла высокотемпературной камеры сгорания и высоконагруженной турбины высокого давления следует уделять особое внимание согласованию работы отдельных составляющих элементов на нестационарном режиме.

2. Расчетным путем показано, что в случае наличия в спектре собственных частот рабочей лопатки 12-х гармоник, возможны дополнительные мероприятия по ослаблению возбуждающих сил путем влияния на источник этих гармоник, чтобы обеспечить надежную эксплуатацию турбины ТВД в режиме резонанса без существенной переделки конструкции.

Литература

1. Самойлович Г.С. Возбуждение колебаний лопаток турбомашин. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
2. Нестационарные явления в турбомашинах / В.Г. Августинович, А.А. Иноземцев и др. – УО РАН, Екатеринбург – Пермь, 1999. – 280 с.
3. Лапотко В.М., Кухтин Ю.П. Преимущества использования подвижных, лагранжевых сеток при численном моделировании течений сплошных сред // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. – Х.: ХАИ. – 2000. – Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 88 – 92.
4. Мунштуков Д.А. Дивергентные формы уравнений, описывающих движение среды в турбомашинах (учебное пособие). – Х.: ХАИ, 1995. – 73 с.

Поступила в редакцию 30.04.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Г. Солодов, Харьковский национальный автомобильнодорожный университет, Харьков.