

конструкции ОАТ, возможна, по мнению автора, на основе формализации в едином продукте системы показателей и требований обеспечения лётной годности конкретного авиационного изделия. Данная структура должна выстраиваться на основе определения и использования технических, правовых

и экономических факторов, влияющих на лётную годность ОАТ, в целях формирования его типовой конструкции на уровне актива, который имеет ценность при сертификации и эволюции его результата, а также создания научно-технического задела для новых направлений развития.

УДК 621.452

## РОТОР-СТАТОР ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРАХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

©2016 В.Э. Сарен

Центральный Институт Авиационного Моторостроения имени П.И.Баранова, г. Москва

## ROTOR-STATOR INTERACTION IN GTE AXIAL COMPRESSORS

Saren V.E. (Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation)

*Rotor-stator interaction is one of the most pressing and challenging problem of turbomachine aerodynamics. The enormous experience that has been accumulated during the development of gas-turbine engines and power plants proves to be insufficient for estimating the pressure pulsations at the design stage, blade vibrations, radiated noise, and gas-dynamic losses in promising compressors and turbines designed for high-power characteristics of stages. In this paper has been studied the gas dynamics inside row stator-rotor-stator system of axial compressor.*

Проектирование современных осевых газотурбинных двигателей (ГТД) предполагает оценку пульсаций давления, вызванных ротор-статор взаимодействием. Как показали эксперименты на компрессорной ступени с входным направляющим аппаратом [1, 2] и на 4-х ступенчатой турбине [3, 4] при типичных осевых зазорах между венцами взаимное окружное расположение статоров существенно влияет на обтекание лопаток ротора.

В данной работе рассматривается система венцов статор (S1)-ротор (R)-статор (S2) в проточной части осевого компрессора. Центральный венец в рассматриваемой совокупности венцов оказывается в условиях совместного воздействия возмущений от венцов, расположенных выше и ниже по потоку. Выполненный в работе анализ основан на определении кинематически допустимых течений и гидродинамических механизмов, связанных с ротор-статор взаимодействием.

Обозначим через  $\Pi$  некоторый параметр течения (скорость, давление и т.п.), описываемого в цилиндрической системе координат, в которой  $r, \varphi, x$ , соответственно, радиальная, окружная и осевая координаты точки. Пусть  $\Delta\varphi_s = N_{S1} \cdot \Delta\varphi_{S1} = N_{S2} \cdot \Delta\varphi_{S2}$ , где

$N_{S1}$  и  $N_{S2}$  взаимно простые числа и через  $\Delta\varphi_{S1}$  и  $\Delta\varphi_{S2}$ , соответственно, обозначены угловые шаги статоров S1 и S2. Тогда из свойства цикличности системы венцов S1-R-S2 следует представимость параметра  $\Pi$  в виде двойного ряда Фурье.

$$\Pi(t, r, \varphi, x) = \sum_n \sum_k \Pi_{nk}(\Omega, x, r) e^{2\pi jk \frac{\varphi}{\Delta\varphi_R}} \cdot e^{2\pi in \frac{\Omega t - \varphi}{\Delta\varphi_S}},$$

где  $t$  – время и через  $\Delta\varphi_R$  обозначен угловой шаг ротора;  $\Omega$  – угловая скорость вращения ротора. Координаты  $(t, r, \varphi, x)$  относятся к точкам пространства, в котором описываются статорные венцы S1 и S2, а величина  $\Delta\varphi_S$  равна их общему окружному периоду. Здесь и далее  $n, k=0, \pm 1, \pm 2, \dots, i, j=\sqrt{-1}, (i, j \neq -1)$ .

Уровень ротор-статор взаимодействия может быть оценен величиной

$$F(x, r) = \frac{\Omega}{\Delta\varphi_S \cdot \Delta\varphi_R} \int_0^{\Delta\varphi_S} \int_0^{\Delta\varphi_R} [\Pi(t, r, \varphi, x) - \Pi_{00}(x, r)]^2 dt d\varphi$$

и вполне определяется коэффициентами Фурье вида  $\Pi_{nk}$ . Если венец S2 подвергнут окружному смещению относительно венца S1 на угол  $\nu$ , где  $0 \leq \nu \leq \Delta\varphi_S$ , то из определения величины  $F(x, r)$  следует равенство

$$F(x, r) = 4 \sum_{n=0}^{\infty} \left| \sum_{n \neq n_0 N_{S1} N_{S2}} \sum_{k=1}^{\infty} |\Pi_{nk}|^2 + 4 \sum_{n_0=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} |\Pi_{n_0 N_{S1} N_{S2} \cdot k}|^2 \right| \times \left| 1 + e^{2\pi i n_0 N_{S1} N_{S2} \frac{v}{\Delta \varphi_S}} \right|^2.$$

Таким образом, взаимное окружное смещение венцов S1 и S2 приводит к изменению величины  $F(x, r)$ . Описанная физическая особенность течения в турбомашине получила название «clocking effect». Величина эффекта зависит от гармоник вида  $n_0 N_{S1} N_{S2}$  и достигает максимальных значений при равных угловых шагах венцов S1 и S2 ( $N_{S1} = N_{S2} = 1$ ). Как показывают многочисленные эксперименты, оптимизация параметра  $v$  позволяет вдвое снизить уровень пульсаций параметра  $\Pi$  в турбомашине.

Для экспериментальной оценки шума, излучаемого системой венцов S1-R-S2, использовался входной ресивер экспериментальной установки УК2ЭЖ, который был аттестован как реверберационная камера. Оптимизация взаимного окружного расположения статоров в системе венцов S1-R-S2 позволяет снизить излучаемый суммарный шум на 3,7 дБ. При этом происходит существенное (на 4,5 дБ) снижение тонального шума на основной частоте следования лопаток ротора, где шум наиболее значителен.

Выполненный выше анализ исходит из того, что для типичных параметров осевых турбомашин эффекты ротор-статор взаимодействия являются существенными как для оценки пульсаций, так и для определения осреднённых по времени параметров течения. Результаты анализа приводят к следующим заключениям.

1. Наиболее важным отличием течения в рассматриваемой системе взаимно движущихся венцов от обтекания изолированных венцов является наличие за взаимно движущихся венцами свободных (сносимых потоком) вихрей, которые согласно теореме Кельвина компенсируют изменение циркуляции скорости на лопатках вследствие ротор-статор взаимодействия. Диссипация свободных вихрей является основным источником дополнительных газодинамических потерь в турбомашине. Оптимизация параметра  $v$  позволяет повысить на 1,5-2,0%

КПД компрессора, содержащего систему венцов S1-R-S2.

2. Методы численного решения уравнений гидродинамики в применении к течениям в турбомашине во всяком случае должны обеспечивать моделирование процессов диффузии и диссипации периодических по времени и по пространству свободных вихрей в вихревых следах за лопатками [5-7].

Работа завершается описанием экспериментов, выполненных с целью исследования ротор-статор взаимодействия в осевых турбомашине. Наиболее интересные результаты были получены на крупноразмерной установке УК2ЭЖ, где была выполнена лазерная анемометрия течения в межвенцовых областях.

#### Библиографический список

1. Saren V.E. Some Ways of Reducing Unsteady Blade Loads Due to Blade Row Hydrodynamic Interaction in Axial Flow Turbomachines // Second International Conference EANE, Pilsen, Czech Republic, 1994. P.160-165.
2. Saren V.E. Relative Position of Two Rows of an Axial Turbomachine and Effects on the Aerodynamics in a Row Placed Between Them // Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachines, Elsevier, 1995. P.421-425.
3. Huber F.W., Johnson P.D., Sharma O.P. et al. Performance improvement through indexing of turbine airfoils. Part 1. Experimental Investigation // ASME Paper. No. GT-27 (1995).
4. Griffin L.W., Huber F.W. and Sharma O.P. Performance improvement through indexing of turbine airfoils. Part 2. Numerical Simulation // ASME Paper. No. GT-278 (1995).
5. Савин Н.М., Сарен В.Э. Гидродинамическое взаимодействие венцов в системе статор-ротор-статор осевой турбомашин // Изв. РАН, МЖГ, 2000. №3. С.145-158.
6. Сарен В.Э., Смирнов С.А. Нестационарные вихревые следы за взаимно движущимися венцами осевой турбомашин // Теплофизика и аэродинамика, 2003. Т.10, №2. С.183-196.
7. Saren V.E., Savin N.M., Smirnov S.A., Krupa V.G. and Yudin V.A. Hydrodynamic Interaction of Axial Turbomachine Cascades // Journal of Engineering Mathematics, 2006. Vol. 55, No 1-4. P. 9-39.