

РАСЧЁТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КЛОКИНГ-ЭФФЕКТА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРЁХСТУПЕНЧАТОЙ ТУРБИНЫ

В.М. Зубанов, Г.М. Попов, С.А. Мельников, А.И. Щербань
Самарский университет им. Королева, Самара, zubanov.vt@ssau.ru

Проектирование и расчетный анализ рабочего процесса турбомашин часто выполняется в предположении стационарного течения рабочего тепла, не зависящего от времени. В действительности, пульсации параметров потока в осевой турбине по причине ротор-статорного взаимодействия («clocking», клокинг-эффект) могут достигать 5-20% от значений параметров усредненных (уравновешенных) по времени [1].

В настоящее время осевые неохлаждаемые турбины имеют достаточно высокую энергетическую эффективность, а дальнейшее повышение их эффективности требует подробного изучения таких явлений, как распространение кромочного следа и его взаимодействия с последующими лопатками, ламинарно-турбулентный переход и др. При проектировании возможно использование различных способов повышения параметров турбины, в том числе изменение окружного положения лопаток турбины друг относительно друга. Однако, для принятия решения требуется информация из рекомендаций или полученная расчётным способом.

В настоящее время для оценки параметров турбомашин получило распространение использование методов вычислительной газовой динамики (CFD). С увеличением производительности вычислительных мощностей и методов расчёта моделирование рабочего процесса турбомашин становилось детальным – от прогнозирования рабочего процесса в одном лопаточном венце до нестационарного моделирования многоступенчатых лопаточных машин.

Прежде всего, направление исследования влияния клокинг-эффекта исследователями выполнялось для осевых многоступенчатых компрессоров [2, 3]. Затем в открытой печати появились исследования клокинг-эффекта на примере турбины [4] и исследование нестационарного ротор-статорного взаимодействия в тур-

бинной ступени. Однако, по причине большой трудоёмкости исследования клокинга статоров и роторов, требующего, как правило, нестационарного моделирования, в научно-технической литературе опубликовано не очень много работ. По данным технической литературы за счёт клокинг-эффекта возможно увеличить КПД турбины до 1%. В связи с этим, исследование клокинг-эффекта в турбомашинах остается актуальной задачей.

Целью данной работы является повышение энергетической эффективности турбины за счёт определения клокинг-положения лопаточных венцов турбины с наибольшим значением эффективности турбины. Объектом исследования является рабочий процесс многоступенчатой осевой турбины, предмет исследования - осевая неохлаждаемая трёхступенчатая турбина (рис. 1). Количество лопаток CA1/PK1/CA2/PK2/CA3/PK3/Стойка составляет соответственно 30/90/60/90/60/90/30.

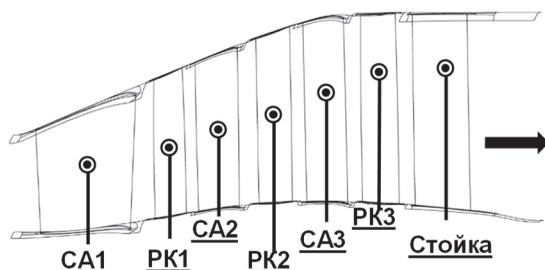


Рис. 1. Исследуемая осевая трёхступенчатая турбина

С одной стороны, некоторое время назад для исследования течений рабочего тела с учетом нестационарных процессов был предложен метод нелинейного гармонического анализа (NLH - метод). Он позволяет существенно сократить время расчёта. При данном методе окружная неравномерность на выходе из предыдущего лопаточного венца преобразуется в ряды Фурье и представляется в виде бегущих волн. Каждая волна в свою очередь раскладывается на гармоники. Количество гармоник, принятое для разложения, влияет на точность получаемых результатов. Чем их больше, тем ближе данные расчета к реальной картине течения. Такой способ расчёта реализован в программном обеспечении *Numeca FineTurbo*. Для дальнейших исследований был выбран метод Clocking Harmonic Method, позволяющий выполнять

реконструкцию потока и параметров турбины по пространству, то есть исследовать разные положения лопаточных венцов относительно друг друга.

С другой стороны, наиболее точным определением параметров турбомашин является нестационарное моделирование рабочего процесса в полноокружной постановке (360 градусов). Однако данный подход очень трудоёмкий. Подход с использованием секторной модели и специальных алгоритмов является менее трудоёмким, но зачастую предъявляет дополнительное требование к равенству секторных моделей. В исследуемой турбине возможно использование секторной модели 12° , поэтому использовалось прямое нестационарное моделирование *Transient*, реализованное в программе *ANSYS CFX*.

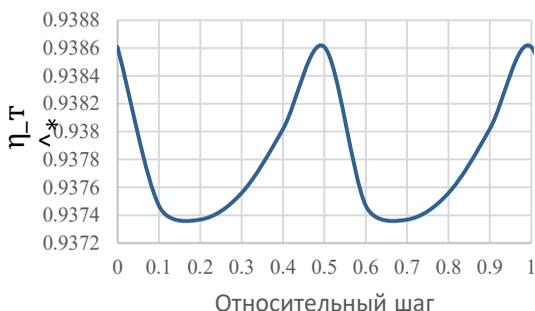


Рис. 2. Влияние углового положения лопатки спрямляющего аппарата на эффективность турбины

Сравнение результатов, полученных с помощью прямого нестационарного моделирования *Transient* в *ANSYS CFX* и с помощью *NLH* – метод в *Numeca* показало, что *Numeca* в сравнении с *ANSYS CFX* прогнозирует завышенные значения КПД и имеет расширенный диапазон колебаний значений. В связи с меньшей трудоёмкостью *NLH* – метода в *Numeca* была выполнена оптимизация клокинг-положения лопаток турбины с использованием данного метода и программы оптимизации *IOSO*. Анализ вариантов оптимизации выявил, что наибольшее влияние на эффективность турбины оказывало положение лопаток спрямляющего аппарата СпрА и третьего соплового аппарата СА3 (рис. 2). Для оптимизированного варианта смещение относительного углового положения СА3 составило 0,06, а СпрА – 0,22.

Оптимизированный вариант турбины был проверен с помощью прямого нестационарного моделирования *Transient* в *ANSYS CFX* (рис. 3). Оптимизированный вариант турбины имел прогнозируемое увеличение энергетической эффективности турбины более чем на 0,0010 по Nimesa (оптимистичный прогноз) и больший КПД на 0,0007 с помощью прямого нестационарного моделирования *Transient* в *ANSYS CFX* (пессимистичный прогноз).

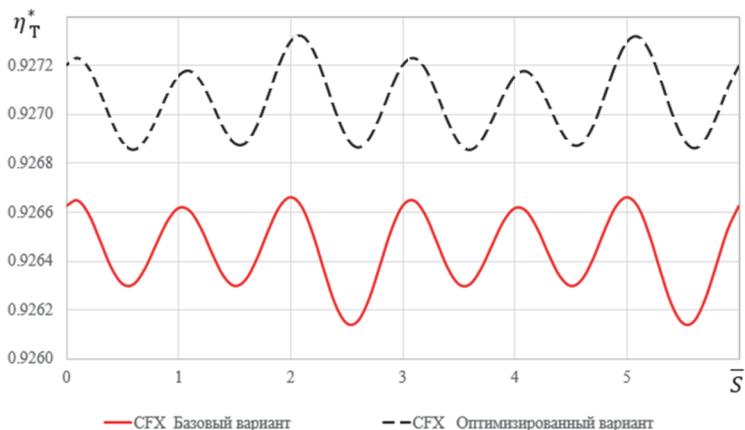


Рис. 3. Сопоставление эффективности исходной и модернизированной турбин в ANSYS CFX

Таким образом, была повышена энергетическая эффективность трёхступенчатой турбины более чем на 0,0007 за счёт оптимизации клокинг-положения лопаточных венцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках государственного задания (номер проекта FSSS-2023-0008, «Фундаментальные проблемы динамики и виброакустики в гидравлических и газовых системах машин и энергетических установок»).

Литература

1. Breugelmans, F. Recent research in the VKI turbomachinery and propulsion department [Текст] / F. Breugelmans // Сборник тезисов Второй международной научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века». – Москва. – 2005. Т. 1.- С. 16-25

2. Hsu S.T. and Wo A.M. Reduction of Unsteady Blade Loading by Beneficial Use of Vortical and Potential Disturbances in an Axial Compressor with Rotor Clocking. Proceedings of ASME TURBO EXPO 1997, 97-GT-86, 1997.
3. Милешин В.И., Дружинин Я.М. Численное исследование клокинг-эффекта роторов и статоров в двухступенчатом высоконагруженном компрессоре // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2018. №54.
4. В. М. Лапотко, Ю. П. Кухтин, А. В. Лапотко Полный анализ clocking-эффектов в 1. 5 ступени газовой турбины с использованием метода отслеживания струй течений газа // Вісник двигунобудування. 2011. №2.