

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВХОДНОЙ РЕГУЛИРУЕМОЙ СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА, РАБОТАЮЩЕГО С ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ

Седунин В.А., Комаров О.В.
Научный руководитель — профессор Бродов Ю.М.

Уральский федеральный университет

Как известно, регулирование расхода циклового воздуха на входе в осевой компрессор на режимах частичной нагрузки путём поворота лопаток входного направляющего аппарата позволяет для энергетических газотурбинных установок большой мощности обеспечить поддержание термодинамического КПД цикла на уровне номинального в широком диапазоне электрической нагрузки (от 60 до 100%). Аналогичный эффект может быть достигнут в газоперекачивающих агрегатах, у которых частота вращения компрессорного вала поддерживается постоянной.

Однако, использование для этих целей только одного ряда поворотных направляющих лопаток приводит к снижению запаса по газодинамической устойчивости компрессора, а также существенное снижение эффективности его работы, что в итоге нивелирует эффект от поддержания термодинамического КПД на высоком уровне. Оптимального и универсального способа сохранения рекомендуемого запаса устойчивости ОК при прикрытии РВНА на сегодняшний день не найдено.

На кафедре «Турбины и двигатели» УГТУ-УПИ проводится исследование вопросов, связанных с регулированием расхода циклового воздуха через компрессор посредством прикрытия РВНА. Некоторые рекомендации по регулированию компрессора с помощью РВНА сообщались ранее в печатных материалах [1,2].

Снижение устойчивости ОК, как показывают ранее проведённые исследования, обусловлено следующими факторами:

1. Большие отрицательные углы атаки на направляющих лопатках первой ступени. Максимально допустимое значение угла атаки по опыту проектирования находится в области 10-15°.
2. Неравномерность потока в радиальном направлении при прикрытии ВНА. Как показали оценочные расчёты первой ступени осевого компрессора с параметрами: $D_k/D_n \approx 0,7$, $u_{cp} = 270$ м/с, $c_a \approx 160$ м/с, при прикрытии ВНА газодинамические параметры за рабочим колесом изменяются неодинаково по радиусу, что приводит к различию углов и скоростей потока по высоте на входе в направляющий аппарат первой ступени. Рассогласование параметров потока по радиусу сопровождается дополнительными потерями энергии и может привести к срыву потока в межлопаточном канале, то есть к потере газодинамической устойчивости компрессора.

В ходе работы были проведены оценочные расчёты изменения параметров по высоте для различных законов закрутки, в ходе которых были выявлены оптимальные значения показателя степени m (если представить закон закрутки как: $c_u \cdot r^m = const$). На рисунке 1 представлены значения угла атаки на направляющих лопатках первой ступени и подводимой работы по высоте ступени при прикрытии ВНА на 15°.

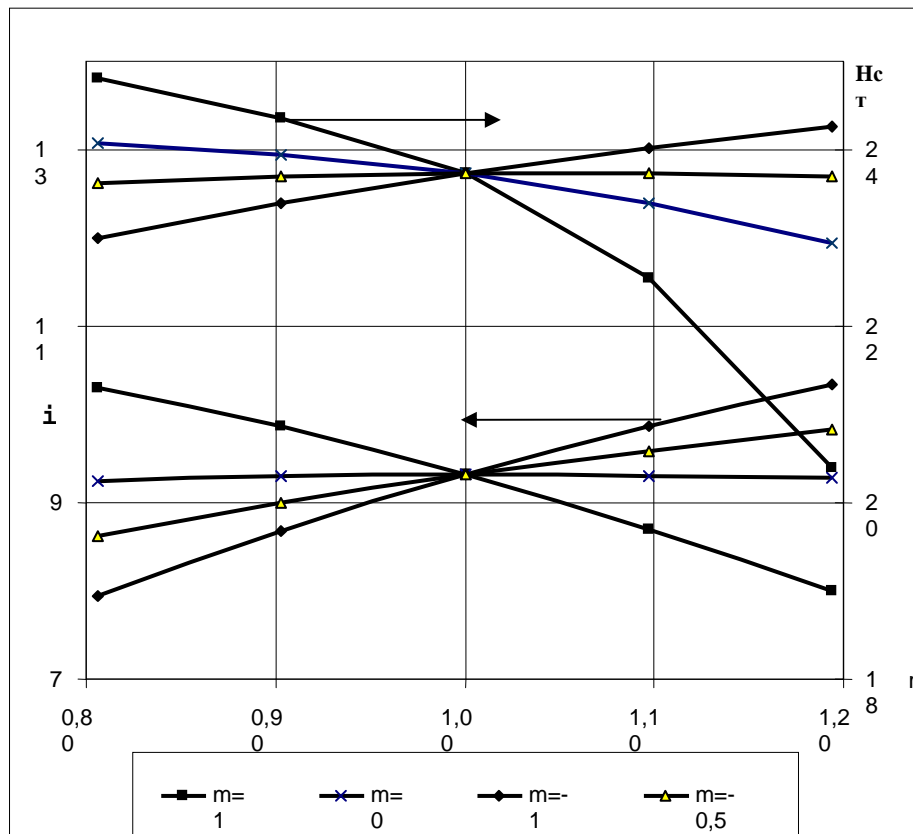


Рис. 1.

При отработке различных законов закрутки критериями для оценки качества ступени были:

1. Равенство углов атаки на НА1 и подведённой работы по высоте первой ступени;

2. Постоянство угла входа потока в НА1 на номинальном режиме, что при постоянном угле выхода из НА1 позволит применять для построения лопаток хорошо отработанный плоский профиль, построенный для работы с большими отрицательными углами атаки.

Таким образом, при достижении постоянных по высоте параметров потока на входе и выходе из НА1, а так же при обеспечении одинакового по радиусу угла атаки при повороте ВНА задача обеспечения устойчивости сводится к отработке плоского профиля. В таком случае, усложнение профиля ВНА и рабочих лопаток, необходимое для обеспечения искомого закона закрутки можно считать оправданным.

3. Небольшая изогнутость профиля ВНА. При прикрытии ВНА на большие углы (до 20°) течение между сильно изогнутыми лопатками повлечёт за собой большие потери. Постоянство расходной составляющей скорости по высоте в данном случае не очевидно.

Таким образом, направляющие лопатки первой ступени, как критический, с нашей точки зрения, фактор, должны быть хорошо отработанными и решать задачи «стабилизации» потока после регулирующей ступени. Подобный подход должен учитываться при проектировании входной группы ступеней осевого компрессора.

Во всех расчётах изменение расходной составляющей скорости принималось в соответствии с теоретической моделью, представленной на рисунке 2. Из которого видно, что расход воздуха принимается как геометрическая функция от угла прикрытия ВНА, а именно, расход определялся из условия постоянного угла входа потока в

рабочее колесо. Безусловно, представленная модель не является единственно верной, поскольку в определённой степени на эту зависимость влияют все венцы входной группы ступеней, характеристика сети в целом и программы регулирования (в частности, соответствие прикрытия регулирующего клапана и поворота РВНА для вырабатываемой мощности). Однако, точность данной модели является достаточной для получения принципиальной картины течения, а так же распределения параметров потока по высоте при прикрытии ВНА [3].

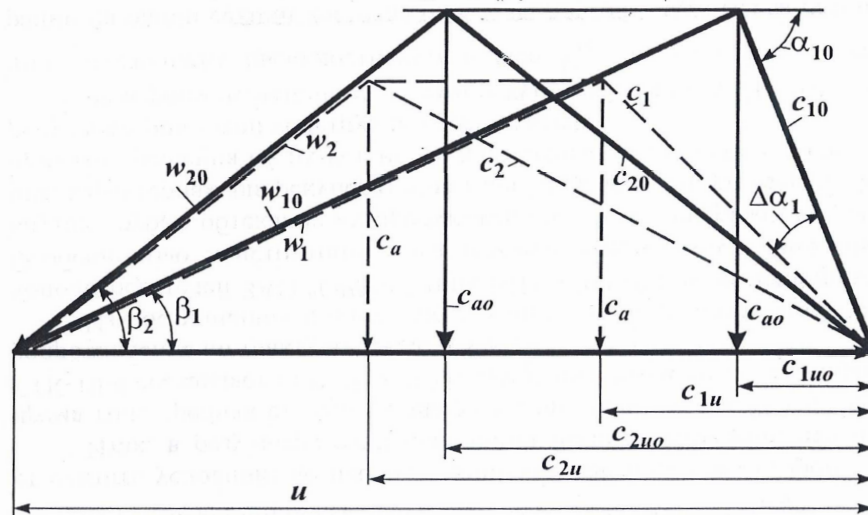


Рис. 2.

По результатам двумерной оптимизации были выбраны отдельные варианты распределения аэродинамических параметров по высоте, которые с помощью специально разработанных автоматизированных алгоритмов были реализованы в трёхмерной проработке с целью последующего анализа и оптимизации регулируемой ступени с помощью решения уравнений Навье-Стокса в 3D постановке.

По результатам расчётов для отдельных ступеней строились интегральные характеристики ступени в координатах Расход-Степень повышения полного давления, а также Адиабатический КПД - Степень повышения полного давления. Такие характеристики для трёх вариантов ступеней можно увидеть на рисунке 3.

Вариант 1, представленный на рисунке соответствует первой ступени компрессора-прототипа (ГТК 25И). Вариант 2 - ступень прототипа, модернизированная на основании трёхмерной оптимизации. Вариант 3 - ступень, изначально спроектированная (на этапе двумерного проекта) для работы в широком диапазоне углов установки лопаток РВНА.

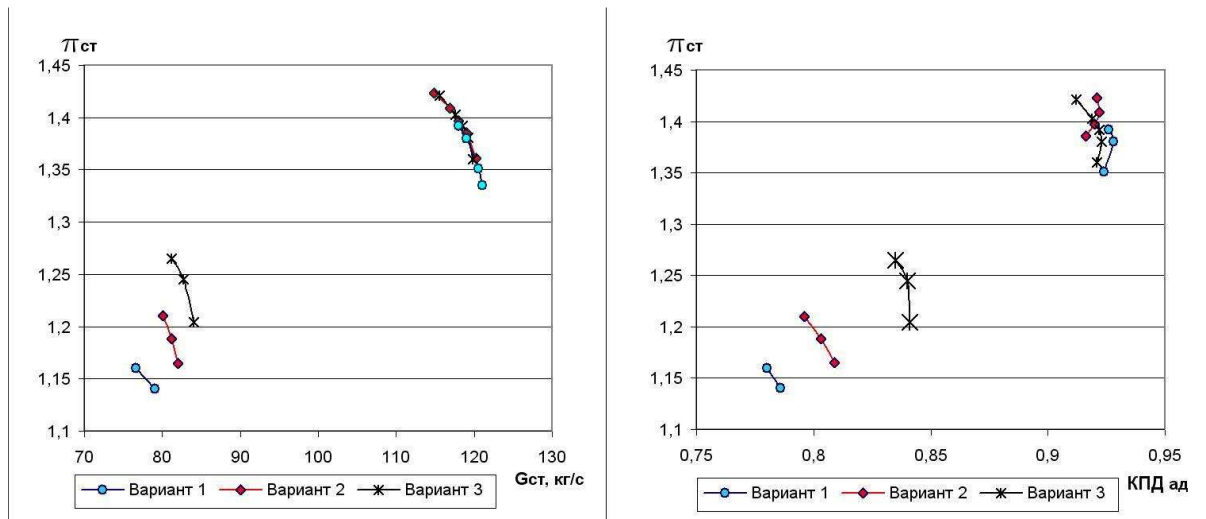


Рис. 3

На рисунке показаны два семейства кривых, соответствующих номинальному углу установки лопаток РВНА и расходу, близкому к номинальному. Второе семейство кривых соответствует полному прикрытию лопаток РВНА и работе на номинальной частоте вращения в результате чего расход циклового воздуха составляет около 70% от номинального.

Как видно из рисунка, степень варианта 3 значительно превосходит другие варианты по КПД при близком к другим вариантам снижении расхода на 30%. Так, для линии рабочих режимов для первой ступени варианта 3 удалось повысить адиабатический КПД более чем на 5% относительно ступени варианта 1.

По результатам работы сформированы рекомендации по проектированию ступени, работающей в широком диапазоне расходов с прикрытием лопаток входного направляющего аппарата.