

Некоторые особенности динамических свойств центробежных компрессорных установок и сети

Я.З. Гузельбаев (ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа»)

Проанализировано поведение центробежного компрессора на основе сопоставления его газодинамических характеристик с характеристикой сети. Показано, что без учета нестационарности характеристики сети имеется опасность возникновения нештатных ситуаций. Приведены два конкретных примера.

Ключевые слова: центробежная компрессорная установка, сеть, нестационарные режимы, помпаж.

Some peculiarities of dynamic properties of centrifugal compressor units and network

Ya.Z. Guzel'bayev

Centrifugal compressor was analyzed basing on correlation of its gas dynamic characteristics and network characteristics. It was shown that if nonstationary character of network characteristics is not taken into account alarm situation may appear. Two real examples are described.

Key words: centrifugal compressor unit, network, nonstationary modes, surging.

При проведении пусконаладочных работ, а иногда и при эксплуатации центробежных компрессорных установок (ЦКУ) наблюдаются процессы, сходные по своим проявлениям с помпажем, однако при этом запас по помпажу бывает достаточно большим, и делать выводы о работе в неустойчивой области, казалось бы, не имеет смысла. Суть проблемы в большом числе случаев может заключаться в динамических свойствах сети, на которую работает ЦКУ.

В литературе слабо освещены вопросы определения рабочей точки ЦКУ при различных режимах работы, при этом специально оговаривается, что расходы и давления на всех участках не зависят от времени, т.е. рассматриваются только статические, установившиеся режимы. Процессы, протекающие при пуске, изменении режима работы и при останове, т.е. зависящие от времени (динамические), практически не рассматриваются, кроме процессов «чисто» нестационарных – помпажа и вращающегося срыва, которые широко освещены в литературе.

Семейство статических характеристик ЦКУ

При создании ЦКУ проводят расчет газодинамических характеристик, в частности зависимости степени сжатия от расхода $\pi = f(Q)$ или давления нагнетания от расхода $p_k = f(Q)$ с указанием «расчетной точки» (рис. 1) которую при сдаче ЦКУ в эксплуатацию необходимо подтвердить при соответствующих параметрах газа на входе.

Однако в рассматриваемом нами аспекте требуется семейство статических характеристик ЦКУ, которые при использовании регулируемого главного привода представляют собой ряд газодинамических характеристик при различных частотах вращения $p_k = f(Q, n)$ либо при разных положениях дроссельной заслонки на входе $p_k = f(Q, m_d)$, рис. 2. В принципе, в последнем случае (см. рис. 2, б) – это семейство статических газодинамических характеристик центробежного компрессора при различных давлениях на входе.

Примерно такое же семейство статических характеристик ЦКУ будет при регулировании характеристик с помощью входных направляющих аппаратов для закрутки потока на входе в рабочее колесо или изменением положения лопаточного диффузора.

С точки зрения систем автоматического регулирования семейство статических газодинамических ха-

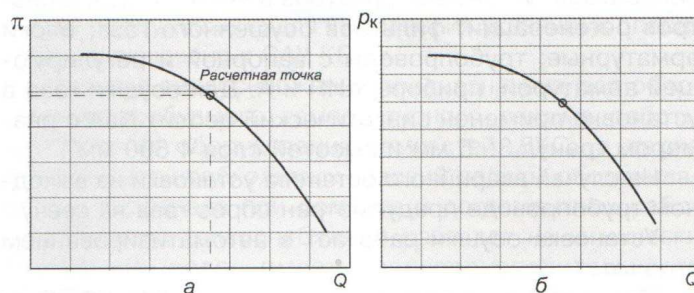


Рис. 1. Расчетная характеристика ЦКУ по степени сжатия (а) и конечному давлению (б)

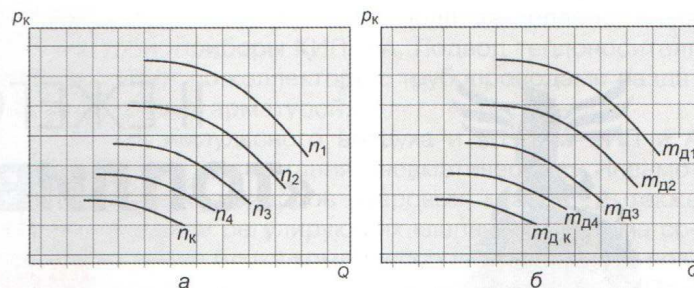


Рис. 2. Семейство статических характеристик ЦКУ при различных частотах вращения (а) и положениях дроссельной заслонки на входе (б)

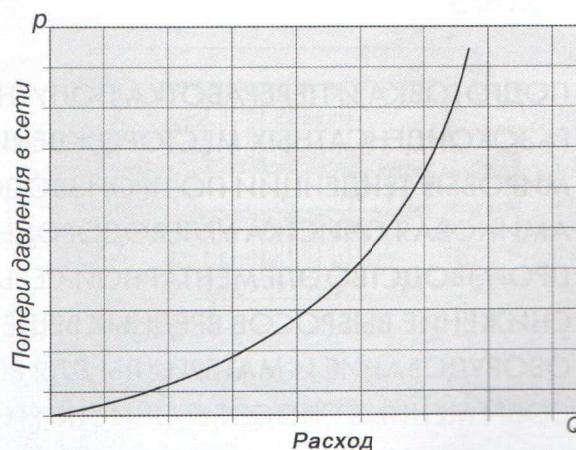


Рис. 3. Характеристика простой трубопроводной сети

рактических показателей показывает возможности ЦКУ при различных значениях регулирующего воздействия.

Статическая характеристика сети

Другая характеристика, которая нас интересует, – это характеристика сети в линии нагнетания, т.е. зависимость сопротивления сети от расхода. Для простых трубопроводных сетей эта характеристика имеет вид квадратичной функции или параболы (рис. 3).

В общем случае сеть состоит из трубопроводной арматуры, трубопроводов с переменной геометрией, холодильников, сепараторов, ректификационных колонн, печей, абсорберов и т.п. На эту сеть могут работать один или несколько компрессоров с одинаковыми или различными производительностями, а из различных линий могут нагнетаться и различные газы.

Сеть может быть простой, однолинейной или сложной, разветвленной, закольцованной или с несколькими контурами и ответвлениями.

Но одно свойство сети неизменно – создатели компрессоров не могут воздействовать на сеть. Ее характеристика считается заданной заказчиком в соответствии с требованиями технологического режима. Но при создании ЦКУ диапазон изменения параметров сети должен быть учтен разработчиком.

Необходимо отметить, что в ЦКУ всегда предусматривают байпасный или сбросной (для воздуха невысокого давления) клапан, предназначенный для создания искусственной сети при пуске и останове компрессора, когда запорная арматура на нагнетании закрыта, а также для защиты от помпажа.

На нагнетании компрессора устанавливают иногда регулируемую арматуру, характеристика которой добавляется к характеристике сети.

Итак, мы можем совместить возможности компрессора (семейство газодинамических характеристик ЦКУ) и характеристику нагрузки (сети), построенные в одних координатах [5]. Точка пересечения характеристик ЦКУ (рис. 4) при частоте вращения n_2 с характеристикой сети C_1 называется рабочей точкой (PT_1), которая определяет выходные параметры компрессора (давление нагнетания $p_{к1}$ и расход Q_1). В этой точке возможности ЦКУ совпадают с потребностями сети.

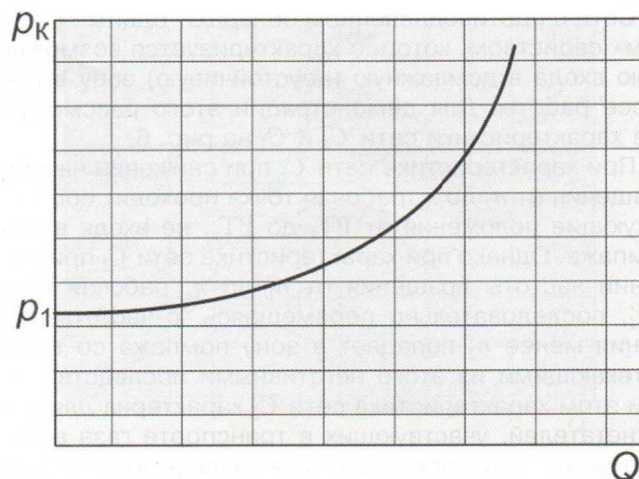


Рис. 5. Характеристика сети с противодавлением

При изменении характеристики сети C_1 на C_2 (которыми мы не управляем) рабочая точка переместится по кривой газодинамической характеристики ЦКУ при частоте вращения n_2 из точки PT_1 в точку PT_2 .

При изменении частоты вращения (которой мы управляем), например с n_2 на n_3 , рабочая точка с PT_2 по кривой характеристики сети C_2 переместится в положение PT_3 (см. рис. 4).

Нетрудно сделать вывод, что характеристика сети, в общем случае неизвестная и задаваемая заказчиком, может быть построена как геометрическое место рабочих точек при изменении регулируемого параметра ЦКУ, например частоты вращения n , от максимального значения до минимально возможного (или наоборот).

Рассмотрим характеристики более сложных сетей с противодавлением, например приведенную в работе [1] (рис. 5). Ей соответствует уравнение

$$p_k = \sqrt{p_1^2 + ART_n Z_n Q^2 \bar{\rho}},$$

где A – коэффициент сопротивления сети, зависящий от ее размеров и конструкции; R – газовая постоянная; T_n – абсолютная температура нагнетания; Z_n – средний коэффициент сжимаемости перекачиваемого газа; Q – расход газа; $\bar{\rho}$ – относительная плотность газа (по воздуху).

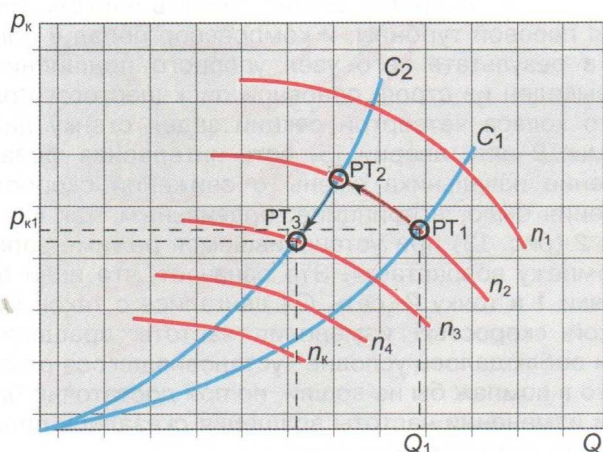


Рис. 4. Определение рабочей точки

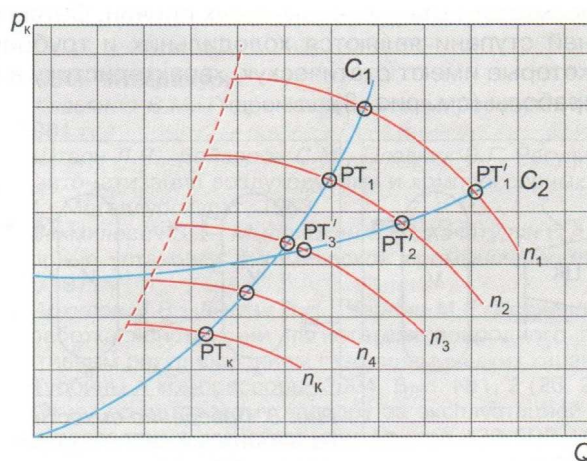


Рис. 6. Проявление особенностей сети с противодавлением

Сети с противодавлением обладают одним «коварным» свойством, которое характеризуется возможностью входа в помпажную (неустойчивую) зону в процессе работы. Для демонстрации этого рассмотрим две характеристики сети C_1 и C_2 на рис. 6.

При характеристике сети C_1 при снижении частоты вращения от n_2 до n_k рабочая точка проходит соответствующие положения от PT_1 до PT_k , не входя в зону помпажа. Однако при характеристике сети C_2 при снижении частоты вращения от n_1 до n_k рабочая точка RT_1 , последовательно перемещаясь, с частоты вращения менее n_3 попадает в зону помпажа со всеми вытекающими из этого негативными последствиями. При этом характеристика сети C_2 характерна для всех нагнетателей, участвующих в транспорте газа в ОАО «Газпром», в компрессорах для газлифтного способа добычи нефти и множестве технологических линий.

Динамическая характеристика сети

Рассмотрим сеть, состоящую из трубопровода и емкости, например сепаратора (рис. 7). Статические характеристики сети представляют собой квадратичную зависимость (см. рис. 3).

Если резко уменьшить подачу компрессора, например, резко снизив частоту вращения, то эта сеть в определенный период времени будет себя вести, как сеть с противодавлением (рис. 8), в зависимости от начального давления, емкости, скорости истечения газа из емкости и скорости снижения частоты вращения. Таким образом, характеристика сети из вида, подобного изображенному на рис. 3, превратится в сеть с характеристикой, подобной представленной на рис. 5, на время переходного процесса.

Рассмотрим два случая из практики, которые имели место при испытаниях и пусконаладочных работах.

При проведении испытаний многофазного центробежного воздушного компрессора «Аэроком» с номинальным расходом 259 м³/мин и давлением нагнетания 3,04 МПа на заводе-изготовителе после снятия газодинамических характеристик решили определить максимально возможное давление нагнетания. Постепенным закрытием клапана на нагнетании достигли давления нагнетания 3,73 МПа и дали команду на останов, не открыв байпасный клапан. После нажатия кнопки «Стоп» компрессор попал в помпаж и только через 15 с вышел из этого режима.

Рассмотрим одну из возможных причин. Сетью последней ступени являются холодильник и трубопровод, которые имеют статическую характеристику в виде параболы (см. рис. 3).

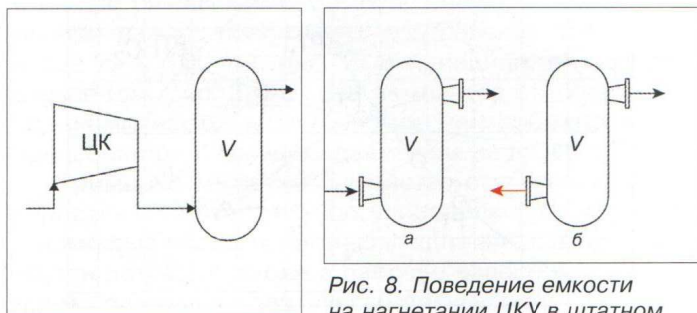


Рис. 8. Поведение емкости на нагнетании ЦКУ в штатном режиме (а) и при резком снижении частоты вращения (б)

Рис. 7. Сеть в виде емкости

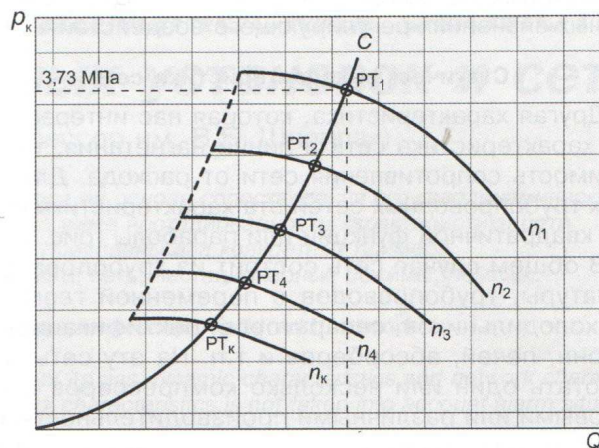


Рис. 9. Траектория движения рабочей точки компрессора «Аэроком» при медленном снижении частоты вращения

Приведенное на рис. 9 семейство статических характеристик компрессора при снижении частоты от n_1 до полной остановки (выбег компрессора) показывает, что рабочая точка перемещается при останове с PT_1 до PT_k по характеристике сети и помпажа быть не должно! Однако помпаж был, и этот процесс можно объяснить динамическими свойствами сети: при останове то давление, которое имеется в момент нажатия на кнопку «Стоп», начинает воздействовать как сеть с противодавлением.

На рис. 10 показана одно из возможных последствий изменения характеристики сети во времени, начиная с момента подачи сигнала на останов компрессора t_0 до момента t_5 , когда переходные процессы завершились.

Динамику изменения характеристики сети можно представить в трехмерной графике (рис. 11). Представление в трехмерной графике динамических характеристик сети и компрессора будет затруднительно для восприятия, но на рис. 12 эти характеристики приведены на плоскости с временными отметками. На этом графике видно, что рабочая точка входит в зону неустойчивой работы (помпаж) и потом выходит из этой зоны.

Второй пример связан с крупной аварией компрессора синтез-газа на Череповецком АТЗ 9 июня 1985 г., когда оператор решил снизить частоту вращения паровой турбины, и компрессор попал в помпаж, в результате чего узел упорного подшипника был выведен из строя, основной диск шестого рабочего колеса четвертой секции задел стенку диафрагмы. В акте аварии [5] есть интересная фраза: «Решение начальника смены о снижении скорости вращения было, в принципе, правильным, так как в точке 2 (рис. 13) при установившемся режиме запас по помпажу возрастает». Это означает, что если бы из точки 1 в точку 2 (сеть C_1) двигались с такой маленькой скоростью изменения частоты вращения, чтобы соблюдалось условие «установившегося режима», то в помпаж бы не вошли, но при достаточно быстром изменении частоты вращения сказались динамические свойства сети (сеть C_2).

Таким образом, учет динамических свойств сети

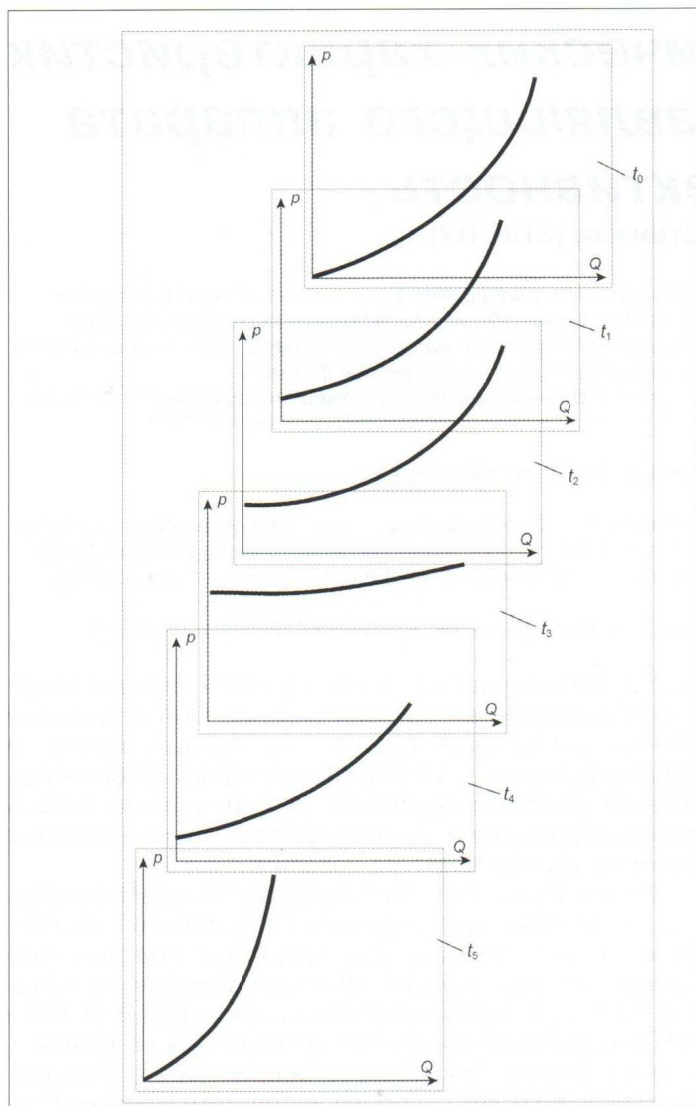


Рис. 10. Динамика изменения характеристики сети

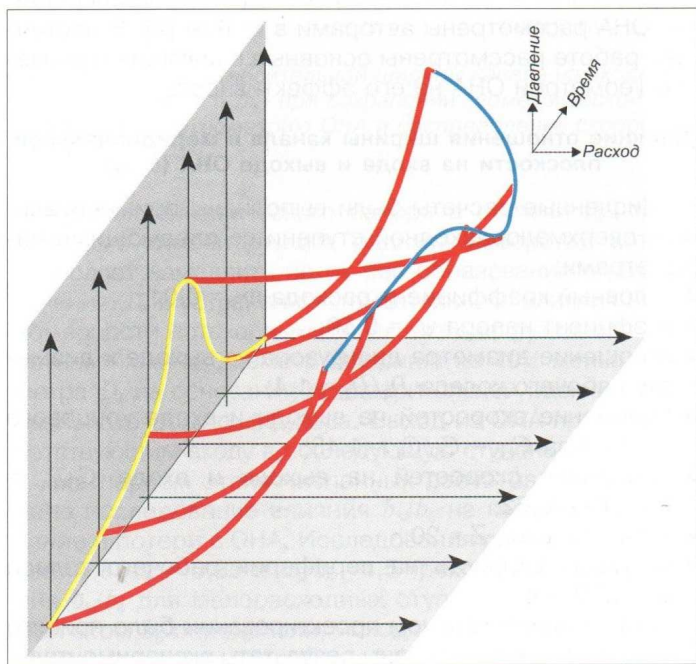


Рис. 11. Динамика изменения характеристики сети в трехмерной графике

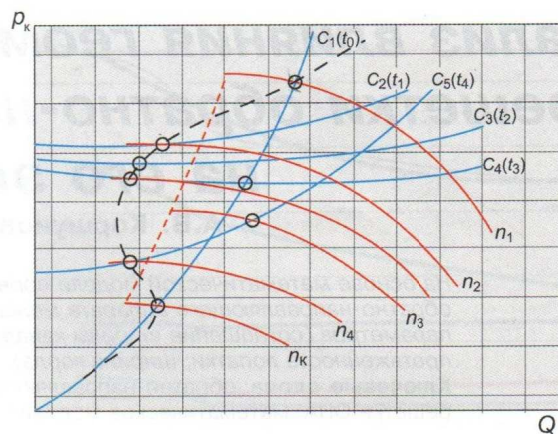


Рис. 12. Траектория движения «рабочей точки» компрессора «Аэроком» при резком снижении частоты вращения

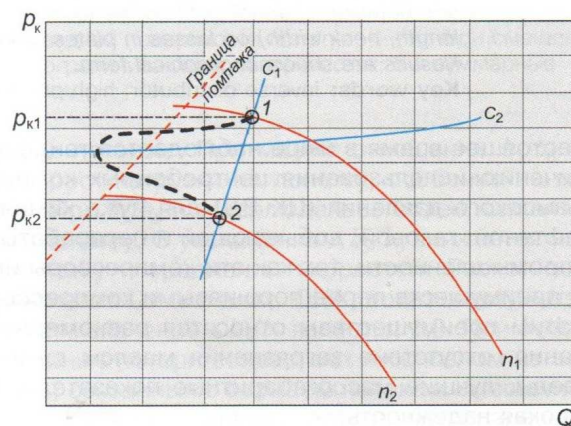


Рис. 13. Траектория движения рабочей точки компрессора синтез-газа при резком снижении частоты вращения:

C_1 – равновесная характеристика сети;
 C_2 – динамическая характеристика сети

при переходных процессах в ЦКУ крайне важен, и этому вопросу необходимо уделить пристальное внимание с проведением теоретических и экспериментальных работ. При этом динамические свойства сети надо учитывать не только в линии нагнетания, но и на линии всасывания. На этом пути исследователей ждут интересные результаты, которые позволят обеспечить надежную и безопасную работу ЦКУ не только в установившихся, но и в самых разных переходных режимах.

Список литературы

1. Касьянов В.М. Гидромашины и компрессоры. М.: Недра, 1981 г.
2. Штерн Л.Я., Бейзеров С.М., Плавник В.Г. Регулирование и автоматизация воздушных и компрессорных станций. М.: Metallurgizdat, 1963.
3. Рахмилевич З.З., Мыслицкий Е.Н., Хачатурян С.А. Компрессорные установки в химической промышленности. М.: Химия, 1977 г.
4. Архипов В.В., Лысюк В.И., Чернин М.Е. Исследование и разработка конструкции нагнетателя природного газа с эффективным регулированием газодинамических характеристик//Турбины и компрессоры. 2004. Вып. №1, 2 (26, 27).
5. Отчет по авторскому надзору за эксплуатацией четырех компрессорных агрегатов синтез-газа 433 ГЦ2-143/25-321 ПМ2 на предприятиях Минудобрений в 1985 году. Казань: НПО «Казанькомпрессормаш» и НИИТК. 1986.