

УДК 681.5.017

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ С ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАГНЕТАТЕЛЯМИ

О.С. Колосов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14
E-mail: KolosovOS@mpei.ru

С.Н. Лепешкин

ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»
Россия, 142100, г. Подольск, ул. Железнодорожная, д. 24
E-mail: LepeshkinSN@gmail.com

А.Д. Пронин

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14
E-mail: dorin007@mail.ru

А.П. Сухецкий

ПАО Банк «ФК Открытие»
Россия, 115114, Москва, Летниковская ул., 2 стр.4
E-mail: for-alexander@yandex.ru

Ключевые слова: управление, газоперекачивающий агрегат, параллельная работа, динамическая модель, помпаж, энергоэффективность.

Аннотация: в докладе вводится в рассмотрение модель параллельно работающих газоперекачивающих агрегатов (ГПА) как единого объекта управления и обсуждаются вопросы синтеза общего цехового регулятора компрессорного цеха, обеспечивающего стабилизацию определенного выходного параметра компримируемого газа. Все проводимые исследования учитывают важное требование, связанное с необходимостью обеспечения отсутствия перерегулирования при изменении давления газа на выходе ГПА. Разработан имитатор ГПА, реализованный в форме математической модели. Имитатор воспроизводит статические характеристики соответствующего центробежного нагнетателя ГПА, отражает инерционные свойства ГПА и в том числе динамику приводного двигателя. Для повышения энергоэффективности системы стабилизации предлагается использовать дополнительный экстремальный регулятор. Разработанное программное обеспечение может быть полезным в составе комплексных тренажеров при отладке шкафов автоматизации ГПА и для обучения персонала компрессорных цехов и станций.

В системе уравнений (1) s – оператор дифференцирования (для сокращения записи в изображениях переменных y_i , U_i и f он не показан); $1 \leq i \leq n$, y_i – выходной регулируемый параметр соответствующего ГПА; $W_i(s)$ – передаточная функция ГПА в окрестности рабочего режима; U_i – регулируемая уставка; K_{U_i} – коэффициент передачи ГПА по уставке; K_f – приведенный к входу ГПА коэффициент передачи по нагрузке, f – величина нагрузки; K_{δ_i} – приведенный к входу ГПА коэффициент самовыравнивания; c – коэффициент жесткости.

3. Динамическая модель стационарной работы ГПА

Динамика отдельного ГПА в составе объекта (1) в зависимости от настройки управляющей части привода в окрестности рабочего режима достаточно полно описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка. С учетом требования отсутствия перерегулирования в переходном процессе корни его характеристического уравнения действительные и отрицательные, один из которых много меньше другого. То есть передаточная функция ГПА, в первом приближении, может рассматриваться как апериодическое звено первого порядка. В операторной форме, например, динамика первого ГПА в (1) представлена системой уравнений:

$$(2) \quad \begin{aligned} y_1(s) &= W_1(s) \cdot (x_1(s) + z_1(s)), \\ W_1(s) &= \frac{1}{T_1 s + 1}, \\ x_1(s) &= K_{U_1} U_1(s) - K_f f(s), \\ z_1(s) &= K_{\delta_1} \delta(s), \end{aligned}$$

где: $y_1(s)$ – степень сжатия для ГПА; $x_1(s)$ – приведенная к входу координата, зависящая от уставки относительных оборотов двигателя ГПА $U_1(s)$ и от величины нагрузки – приведенного объемного расхода газа через нагнетатель ГПА $f(s)$; $z_1(s)$ – моменты самовыравнивания, возникающие при параллельной работе ГПА на общую трубу; T_1 – постоянная времени ГПА; K_{U_1} , K_f , K_{δ_1} – коэффициенты пересчета координат к входу модели ГПА с соответствующими размерностями; $\delta(s)$ – интегральный показатель, зависящий от текущих значений регулируемых выходных параметров других ГПА объекта (1). В общем случае модель (см. раздел 5 «Имитатор ГПА») учитывает нелинейный характер статических характеристик центробежного нагнетателя, когда постоянная времени T определяется нагрузкой и является зависимой от величин входных воздействий, но в окрестности рабочего режима может считаться постоянной.

4. Анализ динамики параллельной работы ГПА

Анализ (1) для идеально одинаковых параметров ГПА и одинаковых уставок U с учетом (2) дает решение в виде.

$$(3) \quad y_1(s) = \frac{s(K_U U - K_f f)(Ts + 1) + cK_\delta(K_U nU - K_f f)}{(Ts + 1)(Ts^2 + s + ncK_\delta)},$$

$$y_2(s) = y_3(s) = \dots = y_n(s) = \frac{sK_U U(Ts + 1) + cK_\delta(K_U nU - K_f f)}{(Ts + 1)(Ts^2 + s + ncK_\delta)}.$$

Анализ (3) показывает, что в установившемся режиме все выходные сигналы становятся равными друг другу, а величина статизма оказывается в n меньше чем при работе одного ГПА.

$$y_1 = y_2 = y_3 = \dots = y_n = y = K_U U - K_f \frac{f}{n}.$$

Другим важным результатом является то, что характеристические уравнения для решений (3) имеют третий порядок и можно показать [3], что корни их будут всегда левыми. Более того, в общем случае, когда параметры каждого из n ГПА, образующие систему (1), работающую на общую трубу, оказываются разными, характеристическое уравнение имеет порядок $(n+1)$. Анализ устойчивости такой системы можно проводить, воспользовавшись методом корневого годографа [3]. В самом деле, можно показать, что характеристическое уравнение в решении (3) может быть представлено как характеристическое уравнение замкнутой одноконтурной системы с передаточной функцией в разомкнутом состоянии имеющей один нулевой корень знаменателя, n отрицательных действительных корней знаменателя (полюсов) и $(n-1)$ корень в числителе (нули числителя). При этом нули в числителе могут быть как отрицательные действительные, так и комплексно-сопряженные с отрицательными действительными частями. Используя свойства корневого годографа, можно показать, что с ростом свободного члена (общего коэффициента k характеристического уравнения замкнутой системы) $(n-1)$ нуль числителя разомкнутой передаточной функции компенсируют $(n-1)$ корень знаменателя. Таким образом, система из n ГПА, работающая на общую нагрузку, сохраняет свою устойчивость при несовпадающих параметрах ГПА.

Несложно показать, что при произвольном порядке передаточных функций ГПА $W_i(s)$ статизм системы (1) при равенстве параметров объектов так же уменьшается в n раз. Вместе с тем приведение характеристического уравнения в (3) к характеристическому уравнению замкнутой одноконтурной системы с изменяющимся свободным членом показывает, что передаточная функция такой системы в разомкнутом состоянии имеет порядок числителя всегда меньше порядка знаменателя на величину $(n+1)$, (где n – порядок характеристического уравнения ГПА). В самом деле, для передаточной функции ГПА первого порядка, как было показано выше, такая разность равна 2 и корневой годограф системы всегда находится в левой полуплоскости. Если передаточные функции ГПА имеют порядок n и отличаются параметрами, то эквивалентная передаточная функция разомкнутой одноконтурной системы будет иметь порядок знаменателя $(2n+1)$, а числителя – n . Согласно [2, 4], для некоторых значений k при $k \rightarrow \infty$ корневой годограф такой системы обязательно переходит в правую полуплоскость и система теряет устойчивость. Таким образом, необходимо учитывать, что устойчивость как самого объекта управления (1), так и всей системы стабилизации с цеховым регулятором всецело зависит от динамики ГПА и от их количества [3,4,5]. В этом смысле естественным оказывается стремление обеспечить динамику ГПА, в первом приближении, как объекта первого порядка.

5. Имитатор ГПА

Более детальный анализ качества управления параллельной работой ГПА с расширением области рабочего режима проводится с использованием нелинейной математической модели (имитатора) ГПА [6]. Входными параметрами имитатора являются: коммерческий расход газа, давление и температура газа, относительные обороты приводного двигателя, а также параметры перекачиваемого газа. Выходными параметрами являются: приведенный объемный расход газа через нагнетатель, степень сжатия, давление и температура газа, приведенная механическая мощность и политропический КПД. Все пересчеты в имитаторе производятся с использованием статических характеристик центробежного нагнетателя ГПА. Динамика задается специальным блоком с интегратором, охваченным нелинейной обратной связью, осуществляющим преобразование приведенного объемного расхода газа в приведенную степень сжатия $\varepsilon_{np} = f([Q]_{np})$. В имитаторе предусмотрена возможность учета динамики приводного двигателя и вводятся ограничения сверху и снизу на величину его относительных оборотов.

Разработанный имитатор ГПА оснащен дополнительным блоком, позволяющим анализировать процессы в ГПА при включении и отключении байпаса [7]. В имитаторе реализуется приближенный, но достаточно физически очевидный подход для оценки параметров смеси газов перед турбиной нагнетателя при открытом кране байпаса. Реализуемый подход базируется на допущении, что давление смеси газов в камере перед турбиной нагнетателя равно давлению газа на входе компрессора P_{ex} . Очевидно, что это давление должно быть несколько ниже входного, но этой разностью пренебрегаем.

Принимаемое допущение позволяет вести расчеты через коммерческий расход газа, как по входу, так и через байпас. В самом деле, вес газа M , проходящего через определенное сечение в единицу времени, можно оценить, зная его коммерческий расход в этом месте и удельный вес газа $\rho_{газа}$ для нормальных условий. Таким образом, через камеру перед турбиной нагнетателя в единицу времени проходит: входной газ весом $M_{BX} = Q_{Kex}\rho_{газа}$ и газ через байпас весом $M_{БП} = Q_{K\delta n}\rho_{газа}$. С другой стороны, вес газовой смеси очевидно составляет:

$$M_{CM} = M_{BX} + M_{БП} = (Q_{Kex} + Q_{K\delta n})\rho_{газа} = Q_{Kcm}\rho_{газа}.$$

Поскольку каждая часть газа, проходящая через общую камеру (в том числе и смесь), обладает своей температурой, то приходим к очевидному соотношению, в котором сократился удельный вес газа при нормальных условиях, а температура смеси газов зависит как от температуры каждого из потоков газов, так и от их массовой доли в общем потоке газа:

$$T_{CM} = \frac{Q_{Kex}T_{BX} + Q_{K\delta n}T_{БП}}{Q_{Kex} + Q_{K\delta n}}.$$

6. Синтез цехового регулятора

Одним из существенных ограничений на работу цехового регулятора является требование отсутствия перерегулирования при отработке ступенчатого управляющего воздействия. Для линейных систем это условие обеспечивается запасом по фазе на частоте среза разомкнутой системы не менее чем 75° . Общий цеховой регулятор с параллельно работающими ГПА может быть синтезирован по методике синтеза регулятора с одним

исполнительным элементом. Для минимизации ошибки в установившемся режиме и, если нет дополнительных требований к быстродействию системы, в системе стабилизации достаточно использовать И-регулятор [4, 5].

Нелинейный характер зависимости $\varepsilon_{np} = f([Q]_{np})$ объясняет разные постоянные времени, получающиеся при работе одноступенчатых ГПА. При этом сохраняется апериодический характер переходных процессов. Меняется лишь их длительность в зависимости от положения рабочей точки ГПА. Методика настройки регулятора для параллельно работающих управляемых ГПА с учетом нелинейного вида их статических характеристик остается такой же, как для систем с линейными исполнительными элементами.

В системе стабилизации приведенного объемного расхода газа знаки уставки и обратной связи необходимо менять на противоположные по сравнению с вариантами систем стабилизации степени сжатия и давления, так как инверсия заложена при переходе от расхода газа к степени сжатия. Помимо этого, система оказывается гораздо более чувствительной к настройкам регулятора и склонна к потере устойчивости при широком диапазоне изменения расхода газа на входе КЦ. В силу этого обстоятельства настройки регулятора приходится изменять так, что уменьшается быстродействие системы и возрастает величина погрешности стабилизации. Во всех системах при исследовании учитывались инерционные свойства приводных двигателей.

Если ГПА отличаются по параметрам в пределе 25%, то методика по-прежнему сохраняется как для систем с одинаковыми исполнительными устройствами.

Все рассмотренные стабилизаторы представляют собой И-регуляторы с фиксированными настройками.

7. Повышение энергетической эффективности КЦ

Для решения задачи повышения энергоэффективности КЦ с параллельно работающими управляемыми ГПА показывается преимущество равномерно распределяемой нагрузки между одноступенчатыми ГПА по сравнению с вариантом, когда все ГПА, кроме одного, выводятся на максимум их текущего КПД, а последний управляемый ГПА обеспечивает требуемое значение выходного стабилизируемого параметра всей системы. Анализируются условия, позволяющие использовать дополнительный экстремальный регулятор для оптимального перераспределения нагрузки между параллельно работающими ГПА в случае неидентичности их параметров с целью повышения КПД компрессорного цеха [8].

Созданные имитаторы ГПА для реализации имитатора КЦ с цеховым регулятором и дополнительным экстремальным регулятором, обеспечивающим оптимальное перераспределение нагрузки между ГПА, полезно использовать как в составе тренажерных комплексов для обучения диспетчеров компрессорных цехов работе в нештатных ситуациях, так и для полунатурного моделирования и отработки вариантов работы систем стабилизации и управления [9].

8. Заключение

В докладе предложена и исследована модель параллельно работающих ГПА как единого объекта управления. Все проводимые исследования учитывают важное требование, связанное с необходимостью обеспечения отсутствия перерегулирования при изменении давления газа на выходе ГПА. Разработан имитатор ГПА, реализованный в

форме математической модели. Имитатор воспроизводит статические характеристики соответствующего центробежного нагнетателя ГПА, отражает инерционные свойства ГПА и в том числе динамику приводного двигателя. Рассмотрена методика синтеза цехового регулятора КЦ при реализации системы стабилизации одного из трех выходных параметров: степени сжатия, давления или приведенного объемного расхода газа через нагнетатель. Для повышения энергоэффективности системы стабилизации предлагается использовать дополнительный экстремальный регулятор. Разработанное программное обеспечение может быть полезным в составе комплексных тренажеров для обучения персонала компрессорных цехов и станций, а также при отладке шкафов автоматики ГПА.

Список литературы

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985. 418с.
2. Колосов О.С., Подольский Д.С. Устойчивость и качество параллельно работающих электромеханических систем гарантированного питания // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. № 1. С. 54-56.
3. Колосов О.С., Сухецкий А.П. Динамика компрессорных станций с параллельно работающими газоперекачивающими агрегатами разного типа. // Управление и информационные технологии (УИТ-2008): Доклады 5-ой научной конференции, Санкт-Петербург, 14–16 окт. 2008 г. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб. 2008, в 2-х т. Т. 2. С. 89 -94.
4. Колосов О.С., Лепешкин С.Н., Сухецкий А.П. Специфика параллельной работы динамических объектов и систем на общую нагрузку // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 10. С. 27-33.
5. Колосов О.С., Лепешкин С.Н., Сухецкий А.П., Зимин В.А. Динамика параллельной работы инерционных систем на общую нагрузку. // Аналитическая механика, устойчивость и управление. Труды X Международной Четаевской конференции. Т 3. Секция 3. Управление. Ч. II. Казань. 13-16 июня 2012 г. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. С. 19-29.
6. Гриценко А.Ф., Зимин В.А., Колосов О.С., Макаров В.А., Лепешкин С.Н., Сухецкий А.П., Цегельников Л.С. Динамическая модель ГПА для исследований, диагностики и отладки подсистем управления компрессором // Промышленные АСУ и контроллеры. 2010. № 6. С. 35-38.
7. Голиков С.А., Зимин В.А., Колосов О.С., Пронин А.Д. Динамическая модель газоперекачивающего агрегата с имитацией режима байпасирования. // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации. Труды XXIV Международной научно-технической конференции (14 – 20 сентября 2015 г., Алушта). М.: Издательский дом МЭИ, 2015. С. 95.
8. Колосов О.С., Лепешкин С.Н., Сухецкий А.П. Использование дополнительного экстремального регулятора для повышения энергоэффективности совместной работы на общую нагрузку систем стабилизации // Вестник МЭИ. 2015. № 1. С. 107-113.
9. Колосов О.С., Лепешкин С.Н., Смирнов В.Н., Фалеев Ю.Р. Имитационная динамическая модель компрессорного цеха реального времени в составе тренажерного комплекса // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 6. С. 19-22.