

СИСТЕМЫ КОМБИНИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

О.О. Гурський, А.В. Денисенко. Системи комбінованого регулювання продуктивності відцентрового компресора холодильної установки. Розглядаються різні системи, що реалізують комбіноване регулювання продуктивності холодильного відцентрового компресора з поворотними лопатками дифузорів. Наведено порівняльний аналіз результатів моделювання розглянутих систем управління.

А.А. Гурский, А.В. Денисенко. Системы комбинированного регулирования производительности центробежного компрессора холодильной установки. Рассматриваются различные системы, которые реализуют комбинированное регулирование производительности холодильного центробежного компрессора с поворотными лопатками диффузоров. Приведен сравнительный анализ результатов моделирования рассмотренных систем управления.

A.A. Gurskiy, A.V. Denisenko. Systems for combined regulation of the centrifugal compressor productivity of refrigerating machinery. Various systems which realize the combined regulation of productivity of a centrifugal refrigerant compressor with the moving blades of a diffuser are considered. The comparative analysis of modeling of the considered control systems is carried out.

Турбокомпрессорная холодильная установка (ТХУ), в состав которой входит центробежный компрессор (ЦБК), является энергоемким объектом. Эффективное управление данным объектом направлено на уменьшение энергопотребления и эксплуатационных затрат.

Во многих случаях, когда стремятся улучшить эффективность функционирования ТХУ, упоминают о целесообразности реализации комбинированного способа регулирования производительности турбокомпрессора по углу установки лопаток диффузора и скорости вращения вала [1]. Реже предлагают использовать другие комбинации способов регулирования производительности центробежных компрессоров, например, изменение угла установки лопаток диффузора с поворотом лопаток входного регулирующего аппарата (ВРА) или с дросселированием на всасывании [2].

Так, в некоторых работах прямо отмечают необходимость создания алгоритма оптимального управления холодильной машиной, который определял бы взаимосвязь частоты вращения ротора компрессора и угла установки лопаток диффузора с требуемой холодопроизводительностью с целью получения высоких значений КПД η [3].

Для реализации комбинированного регулирования производительности холодильного центробежного компрессора (ХЦК) необходимо решить целый ряд проблем:

— обеспечение наивысшего КПД ЦБК $\eta_{\text{ЦБК}}$ не только при стационарных режимах, но и при переходных, при относительно резком изменении нагрузки на испарителе;

— согласование регулируемых параметров в переходном режиме с учетом различных инерционностей, в частности, малой инерционности исполнительного механизма поворота лопаток диффузора и инерционности привода турбокомпрессора;

— обеспечение наивысшего КПД ЦБК $\eta_{\text{ЦБК}}$ в широком диапазоне изменения производительности, при поддержании заданных значений технологических параметров, и при этом без снижения показателей эффективности функционирования холодильной установки в целом.

Рассмотрим различные системы, осуществляющие комбинированное регулирование производительности ХЦК, которые в определенной степени ликвидируют приведенные проблемы. Также проводится сравнительный анализ результатов моделирования предложенных систем управления и делается вывод о целесообразности их применения.

Для осуществления комбинированного способа регулирования производительности центробежного компрессора холодильной установки целесообразно прибегнуть к реализации задачи координации [4] — регулированию соотношения между углом установки лопаток

диффузора α_d , скоростью вращения вала n_v и степенью сжатия π_k ЦБК [5]. Данное функциональное соотношение определяет наивысший КПД турбокомпрессора при различных производительностях установки.

Координирующая система управления (КСУ) производительностью ЦБК ТХУ строится по аналогии с известными подходами, которые определяют КСУ как многоуровневую (в большинстве случаев двухуровневую) систему [4].

Закон управления первого уровня связан с обработкой невязки ψ регулируемого функционального соотношения между углом установки лопаток диффузора α_d , скоростью вращения вала n_v и степенью сжатия π_k ЦБК. Аналитически это можно представить как

$$\bar{u}_1 = \psi \bar{Q} \left(\frac{\delta + \tilde{n}_1}{\delta} \right) = [{}^{<1>}u_1 \quad {}^{<1>}u_2]^T,$$

где $\bar{Q} = [q_1 \quad q_2]^0$ — матрица параметров, которые определяют стабилизирующий вектор, обуславливающий движение к целевому многообразию [4];

$\psi = A^T \bar{y} - b(y)$ — невязка функционального соотношения,

$A^T = [a_1 \quad a_2]$ — матрица коэффициентов регулируемого соотношения;

$\bar{y} = [n_v \quad \alpha_d]^T$ — вектор регулируемых параметров;

p — оператор Лапласа;

c_1 — параметр интегральной составляющей;

$b(y)$ — свободный член, функция от параметра $y = \pi_k$;

${}^{<1>}u_1, {}^{<1>}u_2$ — элементы вектора управления первого уровня.

Закон второго уровня управления реализует обработку ошибки регулирования.

$$\bar{u}_2 = [{}^{<2>}u_1 \quad {}^{<2>}u_2]^T,$$

где ${}^{<2>}u_1 = 0$;

$${}^{<2>}u_2 = \lambda \left(\left(c_{03} + \frac{c_{13}}{p} + c_{23}p \right) (P_{3.кип} - P_{ф.кип}) \right);$$

c_{03}, c_{13}, c_{23} — параметры настройки пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора;

T — знак транспонирования;

$P_{ф.кип}, P_{3.кип}$ — фактическое и заданное давление всасывания (кипения);

λ — параметр, определяющий структурно-временную соподчиненность процесса (режим разделения движения) [4].

Соответственно вектор координирующего управления имеет вид

$$\bar{U} = \bar{u}_1 + \bar{u}_2.$$

Альтернатива координирующей системы управления ТХУ — система управления с расчетным блоком, которая имеет место в известных системах комбинированного регулирования производительности ЦБК [6].

Данная система является оптимальной по режиму управления, так как расчетный блок задает необходимые управляющие воздействия $u_{2\alpha_d}, u_{3n_v}$ по углу установки лопаток диффузора α_d и по скорости вращения вала n_v , которые определяют оптимальное конечное состояние системы. Так реализуется для ТХУ минимальное значение критерия

$$J = \frac{N_{\text{сум}}}{\gamma \eta_{\text{ЦБК}}} \rightarrow \min,$$

где γ — коэффициент веса;

$N_{\text{сум}}$ — суммарная потребляемая мощность турбокомпрессора и контура водяного охлаждения конденсатора;

Система автоматического управления (САУ) с расчетным блоком (РБ) имеет разомкнутую схему, т.е. в ней отсутствует отрицательная обратная связь по производительности турбокомпрессора (рис. 1). ПИД-регулятор 2 внешнего контура регулирования давления кипения

$P_{\text{КИП}}$ задает рабочую информацию χ — необходимое значение производительности ТХУ, а РБ по рабочей информации χ определяет необходимое значение воздействий $u_{2\alpha_{\text{Д}}}$ и $u_{3n_{\text{v}}}$.

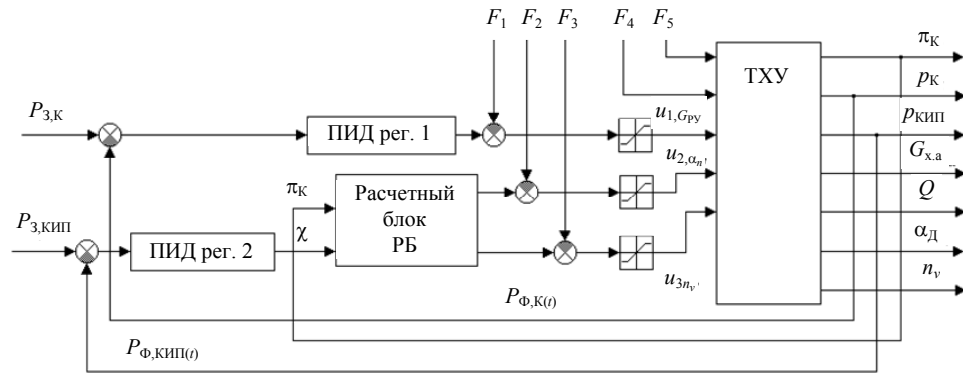


Рис. 1. Структурная схема САУ ТХУ с РБ: $G_{\text{х.а}}$ — массовый расход холодильного агента, Q — производительность компрессора, $F_1 \dots F_5$ — возмущения

Учитывая специфику современного развития систем регулирования и особенности центробежного компрессора, как объекта автоматического управления (существенная нелинейность, многорежимность), можно сделать вывод о необходимости применения интеллектуальных технологий в системе управления, а именно нечеткой логики.

Известно большое количество примеров нечетких логических регуляторов (НЛР), которые обладают преимуществами по сравнению с ПИД-регуляторами при весьма сложных процессах — нелинейных процессах высоких порядков. Включение НЛР вместо ПИД-регулятора в структуру КСУ должно быть вызвано некоторыми причинами, которые связаны с положительными особенностями управления на основе нечеткой логики, а именно: малой чувствительностью к изменению параметров объекта, проявлению адаптивных свойств управления и др.

При реализации КСУ аппарат нечеткой логики можно ввести как в первый уровень управления, так и во второй, также в первый и второй уровень одновременно, все зависит от целесообразности применения реализованной системы.

Приведем пример (рис. 2), где функционирование двухуровневой координирующей системы описывается следующими 9-ью нечеткими правилами:

$$\text{П}_1: \text{Если } \Psi \in N \text{ и } e \in ZE \text{ тогда } \Delta u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w_1, \Delta u_{3n_{\text{v}}} = w_2, u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w'_1, u_{3n_{\text{v}}} = w'_2;$$

$$\text{П}_2: \text{Если } \Psi \in ZE \text{ и } e \in ZE \text{ тогда } \Delta u_{2\alpha_{\text{Д}}} = 0, \Delta u_{3n_{\text{v}}} = 0, u_{2\alpha_{\text{Д}}} = 0, u_{3n_{\text{v}}} = 0;$$

$$\text{П}_3: \text{Если } \Psi \in P \text{ и } e \in ZE \text{ тогда } \Delta u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w_3, \Delta u_{3n_{\text{v}}} = w_4, u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w'_3, u_{3n_{\text{v}}} = w'_4;$$

$$\text{П}_4: \text{Если } \Psi \in N \text{ и } e \in P \text{ тогда } \Delta u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w_5, \Delta u_{3n_{\text{v}}} = w_6, u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w'_5, u_{3n_{\text{v}}} = w'_6;$$

$$\text{П}_5: \text{Если } \Psi \in ZE \text{ и } e \in P \text{ тогда } \Delta u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w_7, \Delta u_{3n_{\text{v}}} = 0, u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w'_7, u_{3n_{\text{v}}} = 0;$$

$$\text{П}_6: \text{Если } \Psi \in P \text{ и } e \in P \text{ тогда } \Delta u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w_8, \Delta u_{3n_{\text{v}}} = w_9, u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w'_8, u_{3n_{\text{v}}} = w'_9;$$

$$\text{П}_7: \text{Если } \Psi \in N \text{ и } e \in N \text{ тогда } \Delta u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w_{10}, \Delta u_{3n_{\text{v}}} = w_{11}, u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w'_{10}, u_{3n_{\text{v}}} = w'_{11};$$

$$\text{П}_8: \text{Если } \Psi \in ZE \text{ и } e \in N \text{ тогда } \Delta u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w_{12}, \Delta u_{3n_{\text{v}}} = 0, u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w'_{12}, u_{3n_{\text{v}}} = 0;$$

$$\text{П}_9: \text{Если } \Psi \in P \text{ и } e \in N \text{ тогда } \Delta u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w_{13}, \Delta u_{3n_{\text{v}}} = w_{14}, u_{2\alpha_{\text{Д}}} = w'_{13}, u_{3n_{\text{v}}} = w'_{14}.$$

где N , ZE , P — множество “большой отрицательный”, “приблизительно нулевой” и “большой положительный”;

$e = G_{3,\text{х.а}} - G_{\text{ф.х.а}}$ — сигнал рассогласования (ошибка регулирования);

$G_{3,\text{х.а}}$, $G_{\text{ф.х.а}}$ — заданный и фактический массовый расход холодильного агента;

Ψ — невязка регулируемого соотношения;

$\Delta u_i = u_{i,k} - u_{i,k-1}$ — приращение выходного сигнала.

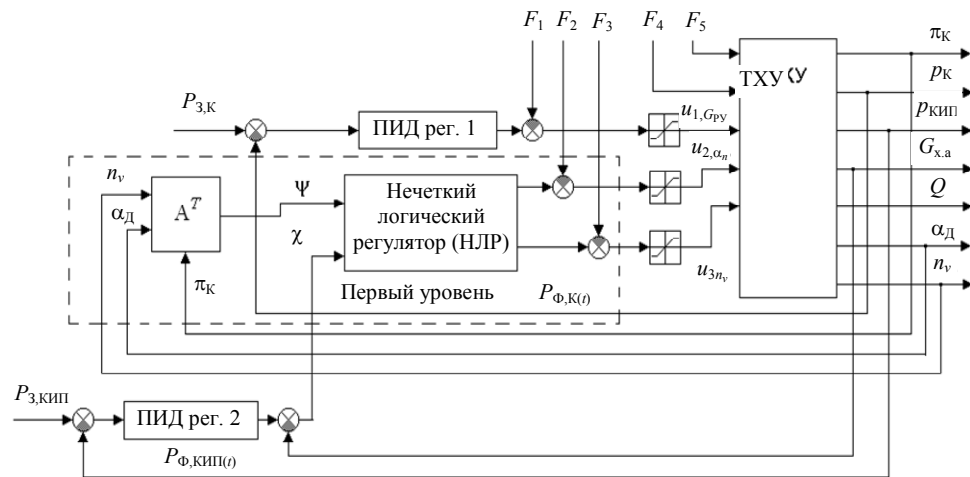


Рис. 2. Структурная схема многоуровневой координирующей САУ ТХУ с нечеткой логикой

При этом управляющее воздействие (выходные воздействия нечеткого регулятора) определяется формулой

$$u_{i,k} = \Delta u_{i,k} + u_i + u_{i,k-1},$$

$$\text{где } \Delta u_{i,k} = \frac{\sum_{r=1}^m \beta_r \cdot w_r}{\sum_{r=1}^m \beta_r}; \quad u_i = \frac{\sum_{r=1}^m \beta_r \cdot w'_r}{\sum_{r=1}^m \beta_r};$$

β_r — функция принадлежности предпосылки r -го правила;

w_r — вещественное значение приращения выходного сигнала.

Настройка данной системы на режим разделения движения (первоначальное движение к целевому многообразию регулируемого соотношения, а затем по нему) имеет некоторую особенность. Нетрудно догадаться, что значения $w_1 \dots w_4$ определяют непосредственное движение к целевому многообразию. А значения w_5, w_{14} определяют необходимый вектор управляющего воздействия $\vec{u}(t)$, который задает движение к целевому многообразию и по нему.

Было проведено моделирование различных САУ ТХУ в программной среде “визуализированная дискретно-непрерывная сеть” [7]. В результате получен ряд переходных характеристик по давлению кипения $P_{\text{кип}}$, изменению невязки ψ соотношения во времени (рисунки 3 и 4).

Данные характеристики позволяют дать сравнительную оценку различным системам управления ТХУ.

Проведенный эксперимент заключается в том, что при ненулевых начальных условиях произведен разгон турбокомпрессорной системы на номинальный режим функционирования, который характеризуется давлениями кипения $P_{\text{кип}} = 3,5 \text{ кгс/см}^2$ и конденсации $P_{\text{к}} = 12,9 \text{ кгс/см}^2$. При этом расход холодильного агента $G_{\text{х.а}} = 90 \text{ кг/ч} \cdot 10^{-3}$, что соответствует 60 % производительности турбокомпрессора. Затем через 6 мин было введено синусоидальное возмущение по давлению кипения.

Из графиков изменения невязки во времени видно, что САУ ТХУ с РБ ликвидирует невязку ψ функционального соотношения, определяющего оптимальные режимы функционирования ТХУ, но только в стационарном состоянии. Сравнивая графики изменения невязки во времени, можно сделать вывод, что при переходных режимах, в частности, при разгоне турбокомпрессорной системы или при синусоидальном возмущении, КСУ ТХУ дает $\eta_{\text{ЦБК}}$ на 5...10 % выше, чем САУ ТХУ с РБ (см. рисунки 3 и 4). Это связано с тем, что КСУ ТХУ способна обрабатывать невязку как при стационарных, так и при переходных режимах. Это хорошо видно на графиках, представленных на рисунке 4: КСУ ТХУ выдерживает невязку ψ в пределах нуля, начиная с 10 с, а САУ ТХУ с РБ, в силу отсутствия в структуре управления обратной связи по невязке ψ , дает большие значения ψ почти до 80 с.

Необходимо отметить, что качество регулирования давления кипения $P_{\text{кип}}$ в САУ ТХУ с РБ существенно не отличается от КСУ ТХУ.

Наиболее удачные результаты были получены при моделировании двухуровневой КСУ, реализованной на базе нечеткой логики. По полученным в результате моделирования графикам переходных процессов установлено, что качество регулирования двухуровневой КСУ, реализованной на базе нечеткой логики, выше, чем при типовой КСУ, реализованной без применения аппарата нечеткой логики. Таким образом, проявление адаптивных свойств управления на основе нечеткой логики стало возможно благодаря реализации логической схемы двухуровневого координирующего управления с нечеткой логикой, так как во втором уровне системы непосредственно проявляется нелинейность статических характеристик ЦБК.

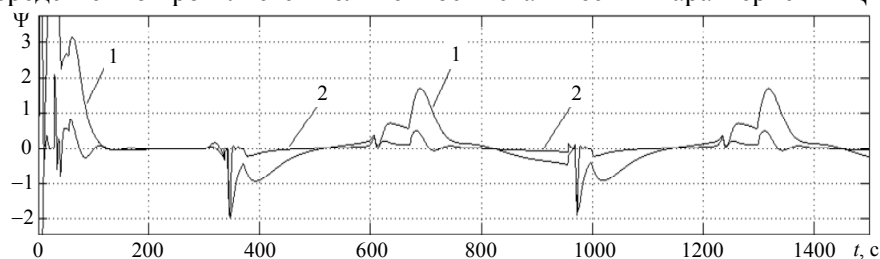


Рис. 3. Графики изменения невязки ψ во времени при синусоидальном возмущении по давлению кипения (всасывания) $P_{кип}$: САУ с РБ (1); КСУ ТХУ (2)

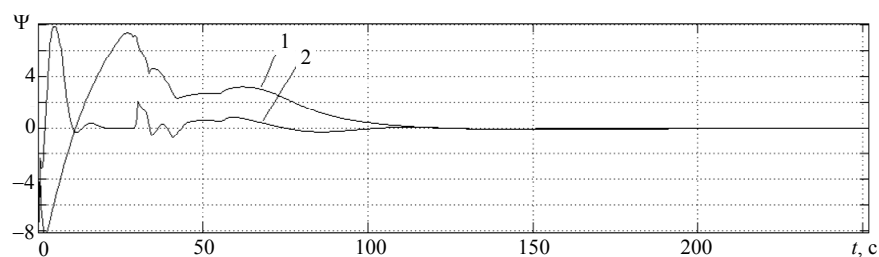


Рис. 4. Графики изменения невязки ψ во времени при разгоне ТХУ на номинальный режим функционирования: САУ с РБ (1); КСУ ТХУ (2)

Проведенный анализ функционирования различных систем управления ТХУ показывает, что каждая из них имеет свои достоинства и недостатки.

Можно сделать вывод о том, что САУ ТХУ с РБ, реализующая регулирование производительности по углу установки лопаток диффузора α_d и по скорости вращения вала n_v , эффективно функционирует, но только при медленном и плавном изменении нагрузки на испарителе. При быстро изменяющейся нагрузке САУ ТХУ с РБ проигрывает по показателям эффективности КСУ ТХУ, хотя последняя более сложна в настройке.

Применение аппарата нечеткой логики в КСУ ТХУ, благодаря адаптивным свойствам, дало улучшение качества регулирования по сравнению с типовой КСУ. Максимальное динамическое отклонение при внесении возмущения уменьшилось в 1,5 раза.

Следует отметить, что реализация КСУ на базе нечеткой логики требует экспертных знаний и интуитивного представления особенности функционирования объекта управления, в противном случае положительные результаты могут быть не получены.

Литература

1. Бухарин, Н.Н. Совершенствование системы регулирования холодильного центробежного компрессора / Н.Н. Бухарин, В.А. Евстафьев, И.К. Ковалкин // Холодил. техника. — 1992. — № 9 — 10. — С. 7 — 9.
2. Чистяков, Ф.М. Холодильные турбоагрегаты / Ф.М. Чистяков. — Изд. 2-е перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1974. — 301 с.
3. Сухомлинов, И.Я. Исследование методов регулирования параметров холодильных машин с центробежными компрессорами / И.Я. Сухомлинов, И.Ю. Савельева, М.В. Головин // Хим. и нефтяное машиностроение. — 1995. — № 11. — С. 29 — 35.
4. Бойчук, Л.М. Синтез координирующих систем автоматического управления / Л.М. Бойчук. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 160 с.
5. Комбинированное регулирование производительности центробежного компрессора холодильной установки / В.А. Денисенко, А.Е. Гончаренко, А.И. Козорез, А.А. Гурский // Холодильная техника и технология. — 2007. — № 6 (105). — С. 93 — 96.
6. Прохоров, А.В. Компрессорные машины с микропроцессорными системами управления, контроля и защиты / А.В. Прохоров, М.Ф. Онучин // Хим. и нефтяное машиностроение. — 1993. — №3 — С. 20 — 23.
7. Згуровский, М.З. Дискретно-непрерывные системы с управляемой структурой / М.З. Згуровский, В.А. Денисенко. — К.: Наукова думка, 1998. — 350 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Положаенко С.А.

Поступила в редакцию 7 октября 2009 г.