

**РАЗДЕЛ 4****АВТОМАТИКА, КОМПЬЮТЕРНЫЕ  
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

УДК: 621.57-53

*А.А. Гурский, В.А. Денисенко, А.Е. Гончаренко*Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартьяновского  
Одесской национальной академии пищевых технологий, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65082**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ХОЛОДИЛЬНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ***Рассматриваются различные системы автоматического управления холодильными установками с центробежными компрессорами. Определены достоинства и недостатки разных систем управления холодильными турбокомпрессорными установками.**Ключевые слова:* Центробежный компрессор – Холодильная установка – Автоматическая система управления – Координирующая система*О.О. Гурський, В.А. Денисенко, О.Є. Гончаренко*Навчально-науковий інститут холоду, криотехнологій і екоенергетики ім. В.С. Мартиновського  
Одеської національної академії харчових технологій, вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082**СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНИХ ВІДЦЕНТРОВИХ КОМПРЕСОРИВ***Розглядаються різні системи автоматичного управління холодильними установками з відцентровими компресорами. Визначені достоїнства та недоліки різних систем управління холодильними турбокомпресорними установками.**Ключові слова:* Відцентровий компресор – Холодильна установка – Автоматична система керування – Координуюча система*A. Gurskiy, V. Denisenko, A. Goncharenko*The V.S. Martynovsky institute of refrigeration, cryogenic technologies and ecological power energy.  
Odessa national academy of food technologies. 1/3 Dvoryanskaya str. Odessa, 65082, Ukraine**SYSTEMS OF REFRIGERATING CENTRIFUGAL COMPRESSORS CAPACITY AUTOMATIC CONTROL***Various systems of automated control of refrigerating machineries with centrifugal compressors are considered. Strengths and weaknesses of various refrigerating turbo-compressor plants different control systems are defined.**Keywords:* Centrifugal compressor – Refrigerating machine – Automatic control system – Coordinating system**I. ВВЕДЕНИЕ**

Современная система автоматического регулирования производительности холодильного центробежного компрессора (ХЦК) должна быть синтезирована с учетом энергоэффективности функционирования холодильной установки в целом. Требования к энергоэффективности функционирования холодильной турбо-компрессорной установки (ХТУ) учитываются многими широко известными фирмами-производителями, такими как Carrier, York, Казанькомпрессормаш и т.д. Таким образом, система автоматического управления (САУ) ХТУ должна обеспечивать стабилизацию

основных технологических параметров, за счет регулирования производительности ХТУ, и экстремальные значения показателей энергоэффективности функционирования (КПД ХЦК, потребляемой мощности ХЦК и контура охлаждения конденсатора). В настоящей работе приводится обзор современных систем регулирования производительности ХЦК, причины использования той или иной системы регулирования производительности, достоинства и недостатки различных алгоритмов управления обеспечивающих энергоэффективное функционирование холодильной установки с ХЦК.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Известно, что изменение производительности центробежного компрессора (ЦБК), в соответствии с тепловой нагрузкой потребителя, можно осуществлять посредством [1]:

- поворота лопаток диффузора;
- дросселирования на всасывании;
- поворота лопаток, установленных перед входом в рабочее колесо;
- изменения скорости вращения вала компрессора;
- изменения количества воды, подаваемой в конденсатор.

Несмотря на широкий выбор возможных способов изменения производительности ХЦК, в современных установках используются преимущественно один или два.

Это можно объяснить следующим образом. В настоящее время в США выпуск малорасходных ХЦК многократно превысил выпуск крупных холодильных компрессоров [2]. Такая тенденция наблюдается не только в США. Малорасходным ХЦК уделяется особое внимание в ОАО ВНИИхолодмаш-холдинг [3] и в других известных организациях, занимающихся разработкой ХТУ. С уменьшением размеров ХЦК регулирование производительности входным направляющим аппаратом или поворотом лопаток диффузора вызывает значительные конструктивные затруднения [2]. Таким образом, в установках с малорасходными ХЦК применяются системы автоматического регулирования производительности с одним управляющим воздействием по скорости вращения вала компрессора  $n_m$ . При этом, независимо от того, что компрессор с приводом от электродвигателя, питаемого током промышленной или повышенной частоты, или от турбины. [2, 3].

В ХЦК большой производительности, от единиц МВт и выше, регулирование скорости вращения вала возможно, но только с большими капитальными затратами связанными с реализацией частотно-регулируемого электропривода компрессора. Также возможно частотное регулирование, если в качестве привода компрессора выступает газотурбинная или паротурбинная установка. В противном случае, применяют поворотные лопатки диффузоров, если необходим широкий диапазон регулирования или дросселирование на всасывании [1].

Известно о системах управления ХТУ фирм Керриер (Carrier), Йорк (York) (США), которые являются мировыми лидерами в производстве ХТУ, предоставляющими высокоэффективные холодильные машины с центробежными компрессорами, спроектированные на основе передовых технологий [4, 5]. Так, регулирование производительности ЦБК холодильной машины серии 19XR (фирмы Carrier) реализуется за счет применения входного регулирующего аппарата (ВРА). Регулирование производительности поворотом лопаток

диффузора или изменением скорости вращения вала не задействовано. Можно привести еще не один аналогичный пример. Так, в настоящее время, в холодильных установках с ЦБК широко распространено регулирование производительности ХЦК с помощью поворотных лопаток, установленных перед рабочим колесом, при постоянной скорости вращения вала. Данный способ регулирования производительности применяется в холодильных машинах с ЦБК фирм-производителей Trane, Daikin, ОАО Казанькомпрессормаш и т.д. [6 – 10].

Системы автоматического регулирования производительности, применяемые на данных турбокомпрессорных установках большой холодопроизводительности, являются типовыми, основанные на стандартном ПИД-законе регулирования, с одним управляющим воздействием по углу установки лопаток входного регулирующего аппарата.

Обычно принято считать, что холодильная установка с частотно-регулируемым электроприводом проигрывает по капитальным затратам по сравнению с установкой без регулируемого привода. Но при этом известно, что эффективность холодильной установки с переменной скоростью вращения вала ЦБК существенно возрастает при падении нагрузки ниже 90% [11]. Проведенные исследования, отраженные в работах [11 – 13], показали, что эффективность частотного регулирования компенсирует дополнительные затраты на регулируемый электропривод, если холодильная установка проектируется с запасом по холодопроизводительности около 20%. В результате, в настоящее время инверторная технология управления электродвигателем ХЦК уже имеет место в агрегатах холодо-производительностью свыше 800 кВт [14]. Так, появились водоохлаждающие установки серии 19XRV, широко известной фирмы Carrier, с частотно регулируемым приводом и это пример не единственный.

Частотно-регулируемый привод позволяет реализовать энергоэффективный алгоритм управления. Известно о целесообразности использования сразу двух способов изменения производительности центробежного компрессора. Например, регулирование производительности ХЦК по углу установки лопаток диффузора или лопаток ВРА и по скорости вращения вала [15 – 17]. Такое регулирование производительности ХЦК получило название, комбинированное регулирование. Комбинация (одновременное использование) сразу двух способов изменения производительности позволяет сочетать их положительные особенности – широкий диапазон регулирования производительности и оптимальность по энергозатратам.

Примеры таких систем существуют. За рубежом такие разработки имеют место, в частности, для воздушных центробежных компрессоров японских фирм «Hitachi» и «Kobe Steel» [18 – 20]. Также следует упомянуть, что фирма York предлагает, по возможности, установить привод центро-

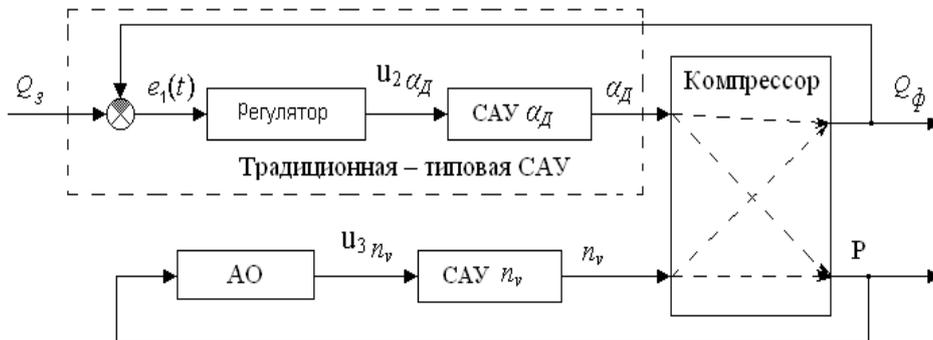
бежного компрессора с переменной скоростью 400V-3-Ph-60/50 Hz на чиллер серии YK. При этом отмечается, что привод с регулируемой скоростью улучшает технические характеристики чиллера серии YK с ЦБК (холодопроизводительностью 900 – 8500 кВт) и может обеспечить в среднем 30% сохранения энергии в год [21, 22]. Кроме того, частотно регулируемый привод дает возможность сочетать закрутку потока с помощью поворотных лопаток с частотой вращения вала компрессора.

Такие системы можно реализовать в рамках поисковых систем экстремального регулирования. В работе [18] приведен пример такой системы, реализующей комбинированное регулирование производительности центробежного компрессора. Такая система, которая является одной из предложенных, представляет собой состав традиционной (типовой) САУ и одноканальной (однопараметрической) системы оптимизации статических режи-

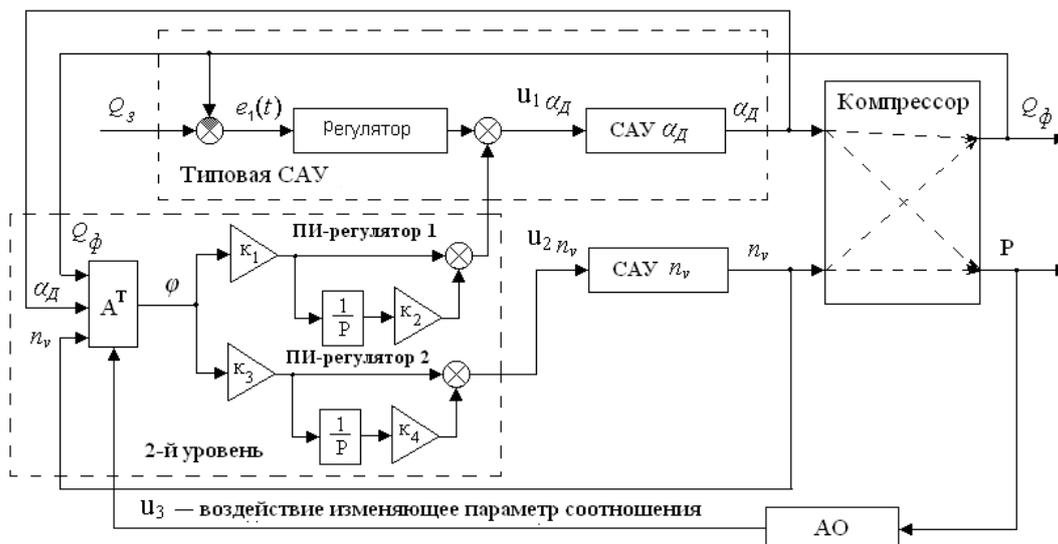
мов [23]. В данной системе, структурная схема которой представлена на рисунке 1, автоматический оптимизатор (АО) осуществляет поиск оптимального значения скорости вращения вала  $n_v$ , после окончания переходного процесса в типовой САУ, вызванного изменением угла установки лопаток диффузора  $\alpha_d$ .

Такая система управления позволяет обеспечить наименьшую потребляемую мощность привода компрессора, но при этом, движение к экстремуму осуществляет после переходных процессов, связанных с регулированием производительности ЦБК, и с присутствием постоянных пробных движений, при этом, не использует известную информацию о траектории дрейфа экстремума.

Приведем пример еще одной предложенной системы в работах [24, 25] и, представленной на рисунке 2, которая лишена некоторых недостатков присущих предыдущей рассмотренной системе.



**Рисунок 1** – Структурная схема типовой САУ компрессорной установки с однопараметрическим автоматическим оптимизатором (АО):  $Q_\phi$ ,  $Q_3$  – фактическая и заданная производительности компрессора



**Рисунок 2** – Структурная схема координирующей САУ компрессорной установки с однопараметрическим автоматическим оптимизатором (АО):  $A^T$  – матрица коэффициентов соотношения параметров;  $\phi$  – невязка соотношения параметров

Данная система (рисунок 2) использует известную информацию о траектории дрейфа экстремума, представленную в виде соотношения

между углом установки лопаток диффузора  $\alpha_d$  и скоростью вращения вала  $n_v$  при определенной производительности компрессора  $Q_\phi$ .

Такою системою можна построи́ти на принципах координуючого управління і без них. В першому випадку (рисунк 2), при координуючому управлінні, в режимі розділення руху [26] обробляється нев'язка  $\varphi$  співвідношення параметрів ( $\alpha_d$  і  $n_v$ ) при перехідному процесі, пов'язаному з регулюванням продуктивності ХЦК, тем самим, забезпечується рух до екстремуму показателя якості  $P$  починаючи з початку перехідного процесу. Во другому випадку відсутній зворотній зв'язок по нев'язці співвідношення параметрів і відсутній режим розділення руху. Але при цьому, як в першому так і во другому випадку автоматичний оптимізатор АО змінює безпосередньо не задаюче впливу по швидкості обертання валу, а співвідношення між кутом установки лопаток диффузора  $\alpha_d$  і швидкістю обертання валу  $n_v$ , при певній продуктивності компресора  $Q_f$ , після перехідного процесу пов'язаного з регулюванням продуктивності ХЦК. Відмінність такої системи ще і в тому, що автоматичний оптимізатор АО необхідний не для пошуку оптимального значення швидкості обертання валу  $n_v$ , а для перевірки правильності виходу в точку екстремуму показателя якості  $P$  і, якщо необхідно, для корекції (співвідношення) заданої інформації про траєкторію дрейфу екстремуму.

Особливістю системи, представленої на рисунку 2, є більш складний параметричний синтез з яким може зіткнутися розробник системи.

### III. ВИВОДИ

На основі аналізу різних інформаційних матеріалів і розглянутих, в нинішній роботі, систем управління ХЦК можна зробити висновок, що в області зниження витрат енергії ХТУ (в результаті оптимізації управління) існують ряд рішень. Для вибору певного рішення необхідно оцінити, розглянуті в нинішній статті, достоїнства і недоліки, і область застосування цих або інших систем управління.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Чистяков Ф.М.** Холодильные турбоагрегаты. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1967. – 287 с.
2. **Баренбойм А.Б.** Холодильные центробежные компрессоры. – Одесская государственная академия холода – Одесса: 2004. – 208 с.
3. **Сухомлинов И.Я., Головин М.В., Славущий Д.Л., Таганцев О.М., Равикович Ю.А., Бабакин Б.С.** Малорасходные холодильные центробежные компрессоры // Химическое и нефтяное машиностроение. – 2004. – №9 – С. 22–26.
4. **КЭРРИЕР** Холодильные машины 19XR Evergreen с центробежным компрессором // Холодильная техника. – 2003. – №6 – С. 26–27.
5. **Carrier.** Технические характеристики холодильных машин с центробежными компрессорами модели серии 19XR холодопроизводительностью

- 700 – 5300 кВт. // Технический бюллетень. – 2006. – №15 – С.15–17.
6. **Заславський В.** Холодильні машини Trane з відцентровими компресорами // Холод. – 2008. – №3 – С. 34–36.
7. **McQuay** Чиллери WSC/WDC с центробежными компрессорами // Технический бюллетень. – 2006. – №15 – С. 19–23.
8. **Хисамеев И.Г., Мифтахов А.А., Сафиуллин А.Г.** Разработка и освоение холодильных машин на базе многовалных мультипликаторных компрессоров для предприятий нефтяной, газовой и химической промышленности. // Холодильная техника. – 2007. – №1. – С 6–10.
9. **Хисамеев И.Г., Мифтахов А.А.** ОАО «Казань-компрессормаш» – вклад в развитие холодильной техники // Холодильная техника. – 2006. – №1. – С 4–8.
10. **Дем'яненко Є.** Нові потужні промислові чилери // Холод. – 2009. – №5 – С. 22–23.
11. **Guven H., Flynn J.** Commissioning TES systems // Heating, Piping, Air Conditioning Magazine. January. – 1992. – P. 55–59.
12. **Hartman T.B.** LOOP Chiller plant dramatically lowers chilled water costs. // Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century. Lahaina, Hawaii. – 1999. – P. 137–144.
13. **Hartman T.** Chiller plant control using gateway technologies // Heating, Piping, Air Conditioning Magazine. January. – 2000. – P. 94–102.
14. **Карякин А.И.** Clint: новый поход к промышленному охлаждению воздуха // Холодильная техника. – 2012. – №12. – С. 16–18.
15. **Бухарин Н.Н., Евсафьев В.Л., Ковалкин И.К.** Совершенствование системы регулирования холодильного центробежного компрессора // Холодильная техника. – 1992. – №9 – С. 7–9.
16. **Сухомлинов И.Я., Савельева И.Ю., Головин М.В.** Исследование методов регулирования параметров холодильных машин с центробежными компрессорами // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1995. – №11 – С. 29–36.
17. **Сухомлинов И.Я., Головин М.В., Славущий Д.Л.** Регулирование характеристик холодильного центробежного компрессора с изменяемой частотой вращения привода (ОАО «ВНИИХолодмаш-Холдинг», г. Москва) // Химическое и нефтяное машиностроение. – 2007. – №7 – С. 29–36.
18. **Прохоров А.В., Онучин М.Ф.** Компрессорные машины с микропроцессорными системами управления, контроля и защиты // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1993. – №3 – С. 20–23.
19. **F. Kano et al.** Large, high-efficiency turbocompressor // R & D. Kobe Steel Engineering Reports. – 1988. – Vol. 38, N 2. – P. 61–64. (англ.).
20. **Terai H.** Turbocompressor with computerized optimum efficiency control device // R & D. Kobe Steel Engineering Reports. – 1988. – Vol. 38, N 3. – P. 99.
21. **York.** Технические характеристики охладителей жидкости с центробежными компрессорами серии YK холодопроизводительностью 750 – 7030 кВт. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.york.com.ua/YORK/>.

22. **York.** Холодильные машины третьего тысячелетия // Холодильная техника. – 2000. – №9. – С. 22.

23. Самонастраивающиеся системы автоматического управления // Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. **В.А. Елисеєва и А.В. Шинянского.** – М. : Энергоатомиздат, 1983. – с. 362 – 365.

24. **Гурський О.О.** Автоматизация холодильной турбокомпрессорной установки на базе системы координирующего керування: автореферат дис. кандидата тех. наук: 05. 13. 07. – Одесса., 2012. – 22 с.

25. **Денисенко В.А., Гончаренко А.Е., Козорез А.И., Гурський А.А.** Комбинированное регулирование производительности турбокомпрессора холодильной установки. // Холодильная техника и технология. – Одесса: ОГАХ, №6, 2007. – С. 68-71.

26. **Бойчук Л.М.** Синтез координирующих систем автоматического управления – М. : Изд-во «Энергоатомиздат». – 1991. – 160 с.

## REFERENCES

- Tchistyakov F.M.** Kholodil'nyje turboagregaty. - M. : Izd-vo "Mashinostrojenije", 1967. – 287 s.
- Barenboym A.B.,** Kholodil'nyje tsentrobezhnyje kompressory. – Odesskaya gosudarstvennaya akademiya kholoda – Odessa: 2004. – 208s.
- Sukhomlinov I.Ya., Holovin M.V., Slavutskiy D.L., Tagantsev O.M., Ravikovitch Yu.A., Babakin B.S.** Maloraskhodnyje kholodil'nyje tsentrobezhnyje kompressoty // Khimitcheskoje i neftyanoje mashinostrojenije. – 2004. – №9 – S. 22-26.
- CARRIER.** Kholodil'nyje mashiny 19XR Evergreen s tsentrobezhnym kompressorom // Kholodil'naya tekhnika. – 2003. – №6 – S. 26-27.
- Carrier.** Tekhnitcheskije kharakteristiki kholodil'nykh mashin s tsentrobezhnymi kompressorami modeli serii 19XR kholodoproizvoditel'nost, jy 700 – 5300 kWt. // Tekhnitcheskiy bjulleten. – 2006. – №15 – S.15-17.
- Zaslav'skiy V.** Kholodil'ni mashiny Trane z vidtsentrovymy kompressoramy // Kholod. – 2008. – №3 – S. 34-36.
- McQuay,** Tchillery WSC/WDC s tsentrobezhnymi kompressorami // Tekhnitcheskiy bjulleten. – 2006. – №15 – S. 19-23.
- Khisameev I.G., Miftakhov A.A., Safiullin A.G.** Razrabotka i osvojenije kholodil'nykh mashin na baze mnogoval'nykh mul'tiplikatornykh kompressorov dlya predpriyatij neftyanoj, gazovoj i khimitcheskoj promyshlennosti // Kholodil'naya tekhnika. – 2007. – №1. – S. 6-10.
- Khisameev I.G., Miftakhov A.A.** OAO "Kazan'kompressormash" – vklad v razvitije kholodil'noy tekhniki // Kholodil'naya tekhnika. – 2006. – №1. – S. 4-8.
- Dem'yanenko Ye.** Novi potuzhni promyslovi tchillery // Kholod. – №1. – S. 4-8.
- Guven H., Flynn J.** Commissioning TES systems // Heating, Piping, Air Conditioning Magazine. January. – 1992. – P. 55-59.
- Hartman T.B.** LOOP Chiller plant dramatically lowers chilled water costs. // Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century. Lahaina, Hawaii. – 1999. – P. 137-144.
- Hartman T.** Chiller plant control using gateway technologies // Heating, Piping, Air Conditioning Magazine. January. – 2000. – P. 94-102.
- Karyakin A.I.** Clint: novyy podkhod k promyshlennomu okhlazhdeniju vozdukha // Kholodil'naya tekhnika. – 2012. – №12. – S. 16-18.
- Bukharin N.N., Yevsaf'jev V.L., Kovalkin I.K.** Sovershenstvovanie sistemy regulirovaniya kholodil'noho tsentrobezhnoho kompressora // Kholodil'naya tekhnika. – 1992. – №9 – S. 7-9.
- Sukhomlinov I.Ya., Savel'jeva I.Yu., Holovin M.V.** Issledovanie metodov regulirovaniya parametrov kholodil'nykh mashin s tsentrobezhnymi kompressorami // Khimitcheskoje i neftyanoje mashinostrojenije. – 1995. – №11 – S. 29-36.
- Sukhomlinov I.Ya., Holovin M.V., Slavutskiy D.L.** Regulirovanije kharakteristik kholodil'noho kompressora s izmenyajemoy tchastotoj vrascheniya privoda (OAO "VNIikhologmash-Kholding", g. Moskva) // Khimitcheskoje i neftyanoje mashinostrojenije. – 2007. – №7 – S. 29-36.
- Prokhorov A.V., Onutchin M.F.** Kompresornyje mashiny s mikroprotsessornymi sistemami upravleniya, kontrolya i zaschity // Khimitcheskoje i neftyanoje mashinostrojenije. – 1993. – №3 – S. 20-23.
- F. Kano et al.** Large, high-efficiency turbocompressor // R & D. Kobe Steel Engineering Reports. – 1988. – Vol. 38. N 2. – P. 61-64. (англ.).
- Terai H.** Turbocompressor with computerized optimum efficiency control device // R & D. Kobe Steel Engineering Reports. – 1988. – Vol. 38. N 3. – P. 99.
- York.** Tekhnitcheskije kharakteristiki okhladiteley zhidkostey s tsentrobezhnymi kompressorami serii YK kholodoproizvoditel'nost'ju 750 – 7030 kWt. [Elektron. resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.york.com.ua/YORK/>.
- York.** Kholodil'nyje mashiny tret'jeho tysyatcheletiya // Kholodil'naya tekhnika. – 2000. – №9. – S. 22
- Samonastraivajushiesya sistemy avtomaticheskoho upravleniya // Spravotchnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu / Pod red. **V.A. Eliseeva i A.V. Shinyanskoho.** – M. : Energoatomizdat, 1983. – s. 362 – 365.
- Gurs'kiy O.O.** Avtomatizatsiya kholodil'noy turbokompresornoj ustanovki na bazi sistemy koordynujutchoho keruvannya: avtoreferat dus. kandidata tech. nauk: 05. 13. 07. – Odessa., 2012. – 22 s.
- Denisenko V.A., Gontcharenko A.Ye., Kozorez A.I., Gurs'kiy A.A.** Kombinirovannoje regulirovanije proizvoitel'nosti turbokompressora kholodil'noy ustanovki // Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya. – Odessa: OGAKh, № 6, 2007. – S. 68-71.
- Boychuk L.M.** Sintez koordinirujutchikh system avtomaticheskoho upravleniya. – M. : Izd-vo "Energoatomizdat". – 1991. – 160 s.

