

**Bibliography (transliterated):** 1. Rotshtein, A. (1999). Intellectual technologies of identification: fuzzy sets, genetic algorithms, neural networks. Vinnitsa: UNIVERSUM, 320. 2. Gabrys, B., Bargiela, A. (2000). General fuzzy min-max neural network for clustering and classification. IEEE Transactions on Neural Networks, V. 11, 3, 769 – 783. 3. Fu, X. J., Wang, L. P. (2001). Linguistic rule extraction from a simplified RBF neural network. Computational Statistics. V. 16, 3, 361 – 372. 4. Zhang, D., Duan, A., Fan, Y., Wang, Z. (2008). A new approach to division of attribute space for SVR based classification rule extraction. Advances in Neural Networks. V. 5263, 691 – 700. 5. Di Nola, A., Sessa, S., Pedrycz, W., Sanchez, E. (1989). Fuzzy relation equations and their applications to knowledge engineering. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 278. 6. Peeva, K., Kyosev, Y. (2004). Fuzzy relational calculus. Theory, applications and software. New York: World Scientific, 304. 7. Rotshtein, A., Rakytyanska, H. (2012). Fuzzy evidence in identification, forecasting and diagnosis. Heidelberg: Springer, 314. 8. Rakytyanska, H. (2015). Fuzzy classification knowledge base construction based on trend rules and inverse inference. East - European J. of Enterprise Technologies. Control Processes. V. 1, 3(73), 25 – 32. 9. Rotshtein, A., Rakytyanska, H. (2013). Expert rules refinement by solving fuzzy relational equations. In Proc. of the VIth IEEE Conference on Human System Interaction. Sopot, Poland, 257–264. 10. Rotshtein, A., Rakytyanska, H. (2014). Optimal design of rule-based systems by solving fuzzy relational equations. Issues and Challenges in Artificial Intelligence. Studies in Computational Intelligence. Heidelberg: Springer. V. 559, 167 – 178. 11. Zadeh, L. (1983). A computational approach to fuzzy quantifiers in natural language. Computers and Mathematics with Applications. V. 9, 149–184. 12. Rotshtein, A., Rakytyanska, H. (2009). Adaptive diagnostic system based on fuzzy relations. Cybernetics and Systems Analysis. 45(4), 623 – 637.

Надійшла (received) 19.02.2015

УДК 004.087.5:004.841.3(045)

**М. П. КРАВЧУК**, канд. техн. наук, доц., НАУ, Київ;

**В. В. ШУЛЕВКА**, аспірант, НАУ, Київ

## АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ ГАЗОПЕРЕКАЧУЮЧОГО АГРЕГАТУ, ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

В зв'язку з безперервним ростом вартості енергоресурсів, збільшенням собівартості транспорту газу, не відновленням його природних ресурсів, найважливішими напрямками робіт в області трубопровідного транспорту газів слід вважати розробки, направлені на зниження та економію енерговитрат, використання з максимальною ефективністю та надійністю газоперекачуючі агрегати (ГПА).

**Ключові слова:** ГПА, газотранспортна система (ГТС), система автоматичного управління (САУ), об'єкт управління.

**Вступ.** В процесі становлення та розвитку нафтогазової промисловості в Україні сформувалась унікальна газотранспортна система, яка відіграє одну із основних ролей в надійному і безперебійному газопостачанні як українських так і європейських споживачів газу, що являється фундаментом для стійкого росту економіки як України так і Європейського Союзу.

Парк газоперекачуючих агрегатів компанії Укртрансгаз складає 692 одиниці, в тому числі с газотурбінним приводом - 438 и електроприводом – 158. У значній мірі ефективність газотранспортних систем залежать від ефективної роботи ГПА.

В порівнянні з іншими типами приводів основні переваги електропривідних ГПА полягають в наступному: висока надійність, яка, значною мірою залежить від

© М. П. КРАВЧУК, В. В. ШУЛЕВКА, 2015

зовнішніх джерел живлення (енергосистем); високі енергетичні (коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності) і регульовальні характеристики електроприводу; мінімальні витрати на відновлення та капітальний ремонт; великий моторесурс енергетичних вузлів і деталей ГПА; простота автоматизації і управління; доступність та екологічна чистота; пожежобезпека.

До недоліків цього приводу слід віднести передусім слабку пристосованість ГПА до змінних режимів роботи газопроводу із-за постійної частоти обертання ротора електродвигуна, а також зростання вартості електроенергії, який різко підвищує експлуатаційні витрати і робить їх зараз несумірними з витратами газотурбінних агрегатів.

При виборі того або іншого типу регульованого електроприводу [1], разом із загальноприйнятими критеріями (масогабаритні показники, вартість, надійність і так далі), слід враховувати наступні особливості: робочий діапазон регулювання швидкості в переважній більшості випадків невеликий; значні встановлені потужності і тривалий режим роботи ЕПГПА визначають підвищені вимоги до енергетичних показників електроприводу; нагнітачі не вимагають граничної точності і високої швидкодії при регулюванні продуктивності.

Характерною особливістю процесу перекачки газу являється нестабільність процесу компримування, нерівномірне транспортування по часу, обумовленого випадковими процесами, що проходять в магістральних газопроводах в різні часи доби і т.д. Це суттєво знижує річну продуктивність компресорних станцій, тому одна з головних задач управління таким об'єктом являється побудова таких систем автоматичного управління, які зможуть забезпечувати максимальну продуктивність процесу перекачки газу при зміні їх характеристик.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для підвищення ефективності роботи ГПА необхідно забезпечити регулювання продуктивності відцентрових нагнітачів. Це може здійснюватись одним із наступних способів [2,3]: зміною частоти обертання; дроселюванням газу на вхід в нагнітач; закруткою потоку на вході в нагнітач; перепуск частини газу з вихода на вхід по обвідній лінії (байпасування газу); зміною числа працюючих ГПА.

Дроселювання газу на вхід нагнітача здійснюється за допомогою дроселюючого органу (вентиля, крана, заслінки і т.д.), що створює додатковий гідравлічний опір. В результаті продуктивність нагнітача зменшується, а споживана потужність електродвигуна залишається незмінною, тому це самий неекономічний спосіб регулювання продуктивності. Однак, завдяки своїй простоті, він використовується на деяких компресорних станціях.

Закрутка потоку може здійснюватись за допомогою поворотних направляючих апаратів (ПНА). Застосування ПНА дозволяє виконати плавну зміну продуктивності нагнітача. За допомогою ПНА можна довести завантаження ГПА до номінальної потужності, а також вирівняти завантаження послідовно працюючих в групі нагнітачів, в результаті чого досягається підвищення ефективності використання корисної потужності ГПА. Цей спосіб широко використовується для одноступінчатих нагнітачів. Для багатоступінчатих нагнітачів застосування не знайшов із-за складності конструкції.

Байпасуванням нагнітача можна забезпечити підтримання мінімально допустимої продуктивності нагнітача при зниженні продуктивності газопровода.

Байпасування призводить до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) із-за великої втрати енергії в результаті перепуску газу на вхід. Тому цей спосіб регулювання застосовується найчастіше як аварійний при приближенні робочої точки компресора (рис. 1) до зони помпажа.

Для повнонапірних нагнітачів, працюючих паралельно, доцільно передбачувати підтримання заданого режиму роботи за допомогою запірно-регулю-

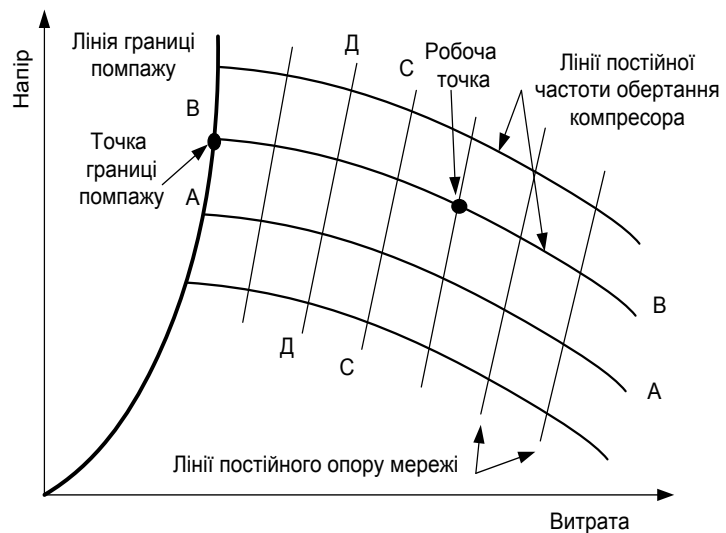


Рис. 1 – Характеристики компресора і мережі

вального клапана, встановлююмого замість крана №6 (байпасний кран) для зв'язку виходу нагнітача з його входом через пусковий колектор. За допомогою такого крана можна здійснювати плавне завантаження нагнітача при пуску, автоматичне регулювання режиму його роботи, а також захисту від помпажа.

Наведений вище аналіз вказує, що функціональні і регулювальні особливості ГПА, як об'єкта управління з врахуванням затрат на байпасування газу, являються фактично єдиним каналом впливу на параметри транспортованого газу в умовах багатопараметричних змін зовнішніх впливів детермінованого (графіки газопостачання та їх параметри) та стохастичного характеру (коливання об'ємів газоспоживання, температури та інших параметрів навколишнього середовища).

**Постановка завдання.** До цього часу в питаннях ЕПГПА, як об'єкта керування не вирішен комплекс актуальних проблем реалізації теоретичних розробок, забезпечуючи надійне та оптимальне функціонування ЕПГПА в умовах КС [4,5]. Умовно можна виділити декілька напрямків розвитку функціонування ЕПГПА:

1. Перетворювач частоти з інваріантним автоматичним регулюванням швидкості високовольтного електродвигуна ЕПГПА для стабілізації оптимального тиску газу на виході КС в умовах дії зовнішніх збурень технологічного та кліматичного характеру.

2. Засоби забезпечення стабільного і стійкого функціонування приводного синхронного електродвигуна ЕПГПА у всіх режимах роботи КЦ шляхом оперативного контролю кута навантаження машини за допомогою бездатчикової системи автоматичного регулювання (САР) збудження на базі цифрових тиристорних збуджувачів з векторним керуванням.

3. Системи електромагнітного підвішування валів і роторів високошвидкісних двигунів і нагнітачів в єдиному конструктивному виконанні для реалізації безмасляних і безредукторних технологій з охолодженням статорних обмоток перекачуванним газом.

4. Програмно-апаратний комплекс вбудованої системи оперативного моніторингу та прогнозування технічного стану електропровідного газоперекачуючого агрегату із застосуванням технічних засобів інтелектуальних

датчиків, нейроконтролерів і алгоритмів Fuzzy- логіки і перспективою переходу до принципів технічного обслуговування і ремонту за фактичним станом обладнання.

5. Синтез сучасних конкурентноспроможних систем автоматичного керування процесом перекачки газу, із здатністю адаптації до характеристик мережі, а також роботи в умовах багатократніх випадкових збурень, таких як зміна навантаження на валу [6,7] (зміна відповідного навантаження в системі), коливання напруги в мережі енергопостачання, на основі використання нейромережевих моделей об'єктів управління.

Виходячи з вище сказаного та враховуючи досягнення в області силової електроніки, мікропроцесорної техніки та машинобудуванні можна дійти висновку що створення високоефективних швидкохідних електропровідних газоперекачуючих агрегатів не представляє великих проблем. Що не можна сказати про системи автоматичного управління ЕППА. Тому їх створення являється дуже вчасним та перспективним.

**Вирішення поставленого завдання автоматичного управління електричного приводу газоперекачуючого агрегату.** На основі джерел [8, 9] та Інтернет-літератури, були вивчені алгоритми роботи систем збудження, які застосовуються на компресорних станція магістральних газопроводів (КС МГ), та інших сучасних систем збудження [10] (АНИКРОН, ЦРВД, ВТ-РЭМ700, КВсдОС, ВТЦ-СД- Б, ТЕ-8, ВТЕ, БВУ, MEGADRIVE-LCI) .

Концерн ABB Daimler Benz Transportation (Німечинна) для приводу технологічних компресорів (ТК), оснащених синхронними двигунами, розроблена серія частотно-регульованих перетворювачів MEGADRIVE - LCI. Розглянемо конкретний електропривід ТК потужністю 12,5 МВт. Функціональна схема керування електроприводом MEGADRIVE - LCI зображена на рис. 2.

На рис. 2: Q — мережевий вимикач; Т – трансформатор; В – керований випрямляч; Д – дросель; І – інвертор; М – синхронна машина; ТН1, ТН2 – трансформатори напруги; ДС, ДС3, ДН, ДШ – датчики відповідно струму, струму збудження, напруги, швидкості; СУВ, СУІ – системи управління відповідно випрямлячем, інвертором; РШ, РС, РНЗ, РС3, РП – регулятори відповідно швидкості, струму, напруги збудження, струму збудження, потужності; ЗШ, ЗН – задатчики

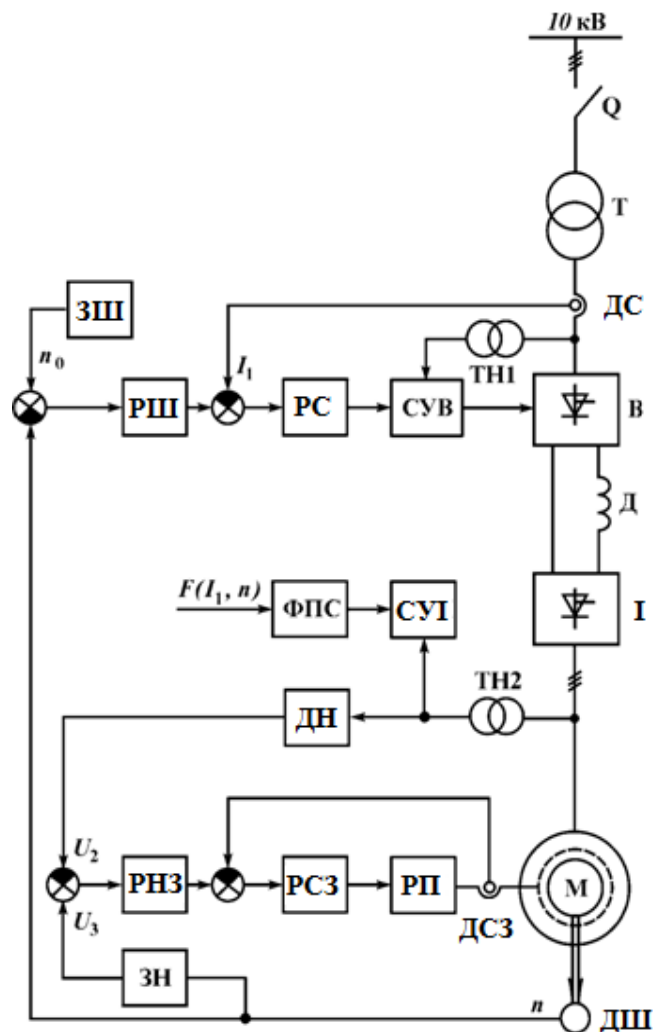


Рис. 2– Функціональна схема управління електроприводом MEGADRIVE-LC

відповідно швидкості, напруги збудження; ФПС – функціональний перетворювач сигналів.

В якості елементної бази перетворювача частоти (ПЧ) використовуються ГТО-тиристори. Перетворювач частоти контейнерного виконання з явно вираженою ланкою постійного струму включає в себе 12-пульсний керований випрямляч і інвертор струму. Живлення ПЧ здійснюється від 3-х обмоточного трансформатора 17 МВА напругою 10 000 / 2х3600 В. Система охолодження ПЧ має проміжний водяний контур (вода з додаванням гліколю).

Для забезпечення електромагнітної сумісності з мережею живлення передбачений двоступеневий фільтро-компенсуючий пристрій потужністю 4000 + 3500 квар.

Управління електроприводом здійснюється від мікроконтролера. Система управління впливає на керований випрямляч, інвертор, безщіточний збуджувач і реалізує закон регулювання  $U/f = \text{const}$ . Цифрове управління використовується для регулювання моменту і швидкості, реалізації систем захистів, управління послідовністю включення і відключення в режимі нормального функціонування, аварійного відключення, а також поточного контролю електроприводу та діагностики.

Внутрішня структура мікроконтролера розроблена і оптимізована таким чином, що він є не тільки швидкодіючим для застосування в електроприводі, але також полегшує застосування проблемно-орієнтованої мови, орієнтованої на користувача. Автоматичний пуск і зупинка електроприводу розбивається на ряд послідовних етапів з проміжним контролем за правильністю функціонування. Можливо як місцеве, так і дистанційне керування.

Програмне забезпечення (ПО) побудовано за модульним принципом з можливістю його нарощування та модернізації. Функції, які реалізовані програмним шляхом в частині управління і надання інформації, запрограмовані інженерною мовою, що не вимагає від користувача підготовки інженера-програміста.

Наведені САУ побудовані на базі мікропроцесорних програмно-технічних засобів (ПТЗ), а також традиційних засобів управління і надання інформації, які використовуються в основному для місцевого управління та екстреної зупинки устаткування при відмові.

**Висновки.** Аналізуючи сучасні системи автоматичного управління, можна дійти висновку, що основою для них являється система збудження на основі тиристорного перетворювача з цифровою системою управління, яка реалізує алгоритм роботи традиційних П- та ПД-регуляторів, чий синтез не визиває теоретичних труднощів. Що ж стосується найбільш перспективних технічних рішень по критеріям якості управління та із здатністю адаптації до характеристик газотранспортної систем, то вони можуть бути отримані тільки на основі використання елементів штучного інтелекта. Це обумовлено суттєвою нелінійністю ЕППА як об'єкта управління, а також роботи в умовах багатократніх випадкових збурень, таких як зміна навантаження на валу (зміна відповідного навантаження в системі), коливання напруги в мережі

енергопостачання, зміна потужності суміжних електроприймачів, підключених до вузла навантаження і т. д.

**Список литературы:** 1. Костенко, Д. А. Вопросы реконструкции компрессорных станций Украины [Текст] / Д. А. Костенко, В. П. Парафейник, А. В. Смирнов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2009. - № 4. - 136 с. 2. Мустафин, М. А. Расчёт энергетических характеристик электроприводов центробежных механизмов в динамических режимах [Текст] / М. А. Мустафин // Труды университета КарГТУ. - 2007. - №1. - С. 83-85. 3. Коршак, А. А. Основы нефтегазового дела. [Текст] / А. А. Коршак, А. М. Шаммазов // Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2005. - 528 с. 4. Крюков, О. В. Пути модернизации электроприводных газоперекачивающих агрегатов [Текст] / О. В. Крюков, С. Е. Степанов // IX МНТК «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» (РАЕР-2012) Украина, Крым, Николаевка, 2012. - С. 209-212. 5. Воронков, В. И. Электроснабжение и электрооборудование линейных потребителей МГ [Текст] / В. И. Воронков, И. Е. Рубцова, О. В. Крюков // Газовая промышленность. - 2010. - № 3. - С. 32-36. 6. Крюков, О. В. Патент РФ №107427 МПК H02P 27/04. Электропривод газоперекачивающего агрегата [Текст]: Крюков О. В., Степанов С. Е., опубл. 10.08.2011. 7. Панин, В. В. Способ оценки технического состояния компрессоров ГТД [Текст] / В. В. Панин, И. Ф. Кинашчук, В. И. Орланов // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - Х.: НАУ "ХАИ". - 2001. - Вип. 26. - С. 236-239. 8. Пужайло, А. Ф. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций [Текст] / А. Ф. Пужайло, С. В. Савченков, Е. А. Спиридович и др // Под ред. О. В. Крюкова – Н. Новгород: Вектор ТиС, в 3 тт. 2010-2012. 9. Слизский, Э. П. Самозапуск электроприводных компрессорных станций магистральных газопроводов [Текст] / Э. П. Слизский, А. Ф. Шкута, И. В. Сбруев. - Москва.: Недра, 1991. - 187 с. 10. Лазарев, Г. Б. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок [Текст] / Г. Б. Лазарев // Силовая электроника. - 2007. - №3. - С. 41-48.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kostenko, D. A., Parafeinik, V. P., Smirnov, A. V. (2009). Voprosy rekonstruktsii kompressornykh stantsii Ukrainy. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie*, 4, 136. 2. Mustafin, M. A. (2007). Raschiot energeticheskikh harakteristik elektroprivodov tsentrobezhnykh mehanizmov v dinamicheskikh rezhimakh. *Trudy universiteta KarGTU*, 1, 83-85. 3. Korshak, A. A., Shammazov, A. M. (2005). *Osnovy neftegazovogo dela*. Ufa: *OOO «DizajnPoligrafServis»*, 528. 4. Kriukov, O. V., Stepanov, S. E. (2012). Puti modernizatsii elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchih agregatov. IX MNTK «Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriia i praktika» (RAER-2012) *Ukraina, Krym, Nikolaevka*, 209-212. 5. Voronkov, V. I., Rubtsova, I. E., Kriukov, O. V. (2010). Elektrosnabzhenie i elektrooborudovanie lineinykh potrebitelei MG. *Gazovaia promyshlennost'*, 3, 32-36. 6. Kriukov, O. V., Stepanov, S. E. (2011). Patent RF №107427 MPK N02R 27/04. *Elektroprivod gazoperekachivaiushchego agregata*. 7. Panin, V. V. Kinashchuk, I. F., Orlanov, V. I. (2001). Sposob otsenki tehniceskogo sostoianii kompressorov GTD. *Aviatsiino-kosmichna tehnika i tehnologiia*. H.: *NAU "HAI"*, 26, 236-239. 8. Puzhailo, A. F., Savchenkov, S. V., Spiridovich, E. A. i dr. (2010-2012). *Energoberezhenie i avtomatizatsiia elektrooborudovaniia kompressornykh stantsii: Monografiia. Pod red. O.V. Kriukova – N.Novgorod: Vektor TiS*, 3. 9. Slizskii, E. P., Shkuta, A. F., Sbruev, I. V. (1991). *Samozapusk elektroprivodnykh kompressornykh stantsii magistral'nykh gazoprovodov*. *Nedra*, 187. 10. Lazarev, G. B. (2007). *Chastotno-reguliruemyi elektroprivod nasosnykh i ventiliatornykh ustanovok. Silovaia elektronika*, 3, 41-48.

Поступила (received) 15.02.2015