

УДК 621.313.323

А. С. Куцик, д-р техн. наук,
М. Б. Семенюк, В. В. Тутка, кандидати техн. наук

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ НАСОСІВ З СИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Анотація. Розроблено математичну модель системи регулювання тиску насоса з частотно-регульованим синхронним електроприводом з застосуванням об'єктно-орієнтованого методу математичного моделювання. Наведено результати дослідження перехідних та ustalених режимів регулювання тиску насосів з синхронним електроприводом в умовах зміни параметрів трубопровідної мережі та зміни завдання тиску.

Ключові слова: насос, синхронний електропривод, регулювання тиску, частотне регулювання, математична модель, синхронний двигун

A. Kutsyk, ScD.,
M. Semenyuk, PhD., V. Tutka, PhD.

ANALYSIS OF THE MODES OF PUMPS PRESSURE REGULATION WITH SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

Abstract. The mathematical model of the pumps pressure control system with the frequency-controlled synchronous electric drive has been developed by using object-oriented mathematical modelling method. The research results of the transient and steady-state mode of the pressure pump regulation are presented in terms network parameters and pressure reference change.

Keywords: pump, synchronous electric drive, pressure regulation, frequency regulation, mathematical model, synchronous motor

А. С. Куцик, д-р техн. наук,
М. Б. Семенюк, В. В. Тутка, кандидати техн. наук

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ НАСОСОВ С СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Аннотация. Разработана математическая модель системы регулирования давления насоса с частотно-регулируемым синхронным электроприводом с применением объектно-ориентированного метода математического моделирования. Приведены результаты исследования переходных и установившихся режимов регулирования давления насосов с синхронным электроприводом в условиях изменения параметров трубопроводной сети и изменения задания давления.

Ключевые слова: насос, синхронный электропривод, регулирование давления, частотное регулирование, математическая модель, синхронный двигатель

Вступ. У приводах насосів великої потужності часто використовують синхронні машини [8, 9]. Застосування частотного регулювання їх швидкості за різними законами регулювання напруги, частоти та струму збудження [1–3, 7] дає змогу суттєво покращити енергоефективність електроприводу. Зокрема, доцільним є застосування закону регулювання $U/f^2 = const$ з $I_f/f = const$ [3].

Основною задачею в насосних агрегатах є регулювання тиску в умовах зміни параметрів трубопровідної мережі [6, 10]. Для розв'язання цієї задачі використовують замкнені системи регулювання тиску (рис. 1).

Завдання дослідження – аналіз режимів регулювання тиску насосів з синхронним електроприводом методом математичного моделювання.

Виклад матеріалу. Для дослідження та аналізу режимів регулювання тиску насосів з синхронним електроприводом була розроблена математична модель з застосуванням об'єктно-орієнтованого методу [4].

© Куцик А.С., Семенюк М.Б., Тутка В.В., 2014

В математичній моделі перетворювач частоти представлений ідеалізованим джерелом змінної напруги, а система збудження – джерелом струму збудження синхронного двигуна (СД).

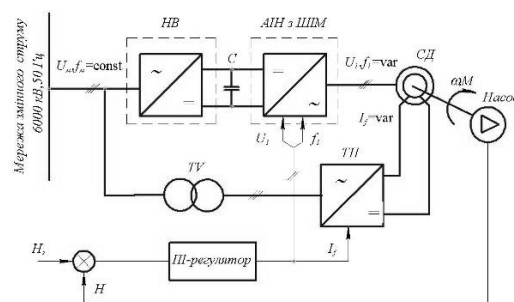


Рис. 1. Система регулювання тиску

Модель СД побудована у фазних координатах, вона враховує не лінійність та вплив демпферної системи [5]. Параметри СД, що використовується в математичній моделі, такі: напруга живлення $U_{ж} = 6$ кВ, потужність 1,5 МВт, струм статора СД $I_c = 295$ А,

струм збудження СД $I_f=350$ А, частота обертання $n = 750$ об/хв.

Насос з номінальними подачею $Q_n=1,75$ м³/с та напором $H_n=80$ м у математичній моделі представлено напірною характеристикою $H=f(Q)$, яка апроксимована виразом

$$H = 118v^2 + vQ - 12,8Q^2, \quad (1)$$

де v – відносна частота обертання СД, та представлена на рис. 2.

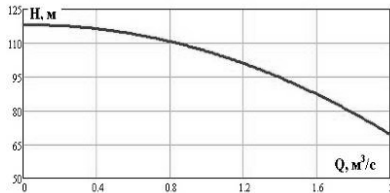


Рис. 2. Напірна характеристика насоса

Статичний момент навантаження СД визначається за формулою

$$M_c(t) = \frac{\rho g Q(t) H_n(t)}{\eta \omega(t)}, \quad (2)$$

де $\rho = 1000$ кг/м³ – густина води, η – к.к.д. насоса, ω – кутова швидкість [рад/с].

Параметри ПІ-регулятора тиску були підібрані експериментально, з умови забезпечення бажаних динамічних та статичних характеристик.

Результати дослідження перехідних та усталених режимів стабілізації тиску насоса з синхронним електроприводом при використанні частотного регулювання за законами керування $U/f^2 = \text{const}$ з $I_f/f = \text{const}$ у випадку зміни гідравлічного опору мережі і, відповідно, витрати представлені на рис.3 та 4.

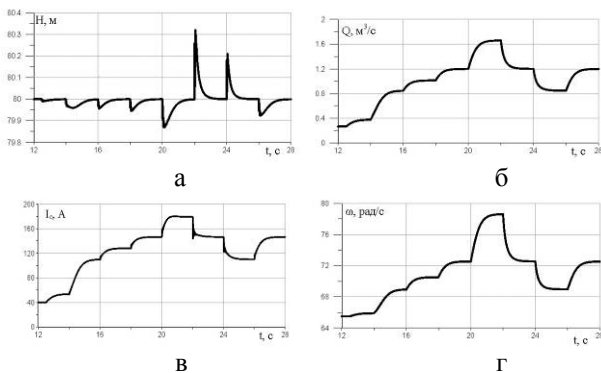


Рис. 3. Напір (а) та витрата (б) насоса, струм статора (в) та кутова швидкість (г) СД

Зі збільшенням витрати від мінімального до номінального значення (рис. 3, б) з метою стабілізації тиску швидкість двигуна збільшується на 18 % (рис. 3, г). Порівняно незначне збільшення швидкості за умови значного діапазону зміни витрат пояснюється виглядом напірно-витратної характеристики насоса (рис. 2), яка є достатньо жорсткою при зміні витрати від 0 до номінального значення. Відповідно змінюються напруга статора СД (рис. 4, б) та струм збудження за законом $U/f^2 = \text{const}$ з $I_f/f = \text{const}$. Мак-

симальна динамічна похибка регулювання тиску при зміні витрати в межах $1,2 \div 1,7$ м³/с становить 0,4 % (рис. 3, а).

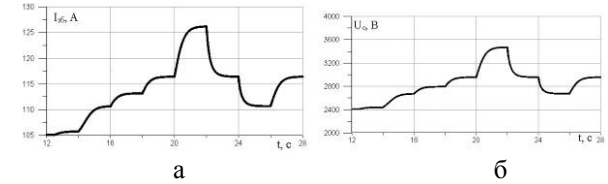


Рис. 4. Струм збудження (а), фазна напруга (б) СД

Результати реакції системи на зміну завдання тиску насоса показані на рис.5 та рис.6.

У випадку зміни завдання напору від 40 м до 80 м (рис. 5, а) змінюється витрата насоса в межах $1,17 \div 1,68$ м³/с (рис. 5, б). ПІ-регулятор тиску забезпечує регулювання частоти обертання СД у межах $56 \div 78$ рад/с (рис. 5, в).

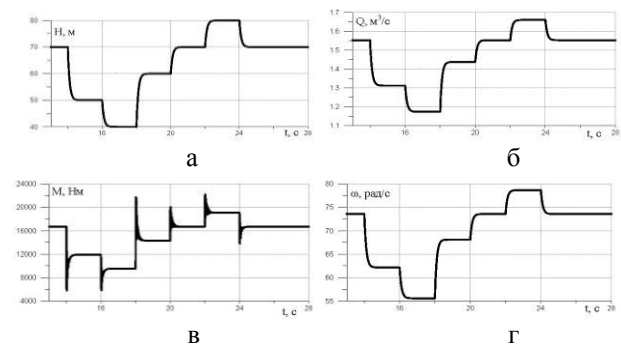


Рис. 5. Напір (а), витрата (б) насоса, електромагнітний момент (в) та кутова швидкість (г) СД

Оскільки при регулюванні частоти та напруги статора (рис. 6, б) СД відбувається одночасне регулювання струму збудження (рис. 5, а), то в усталеному режимі забезпечується постійність кута навантаження (рис. 6, в) та $\cos\varphi$ (рис. 6, г) СД.

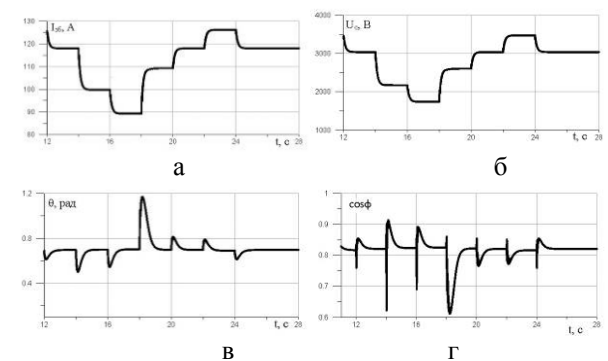


Рис. 6. Струм збудження (а), фазна напруга (б), кут навантаження (в) та $\cos\varphi$ (г) СД

Висновки. Для стабілізації тиску насосу в умовах зміни гідравлічного опору трубопроводу необхідне регулювання швидкості в порівняно невеликому діапазоні (близько 15 – 20 % відносно номінальної). Більший діапазон необхідний для регулювання величини тиску і продуктивності насоса. Для підвищення енергоефективності насосів з синхронним електроприводом доцільно застосовувати закон частотного

регулювання $U/f^2 = \text{const}$ при одночасній зміні струму збудження пропорційно частоті.

Список використаної літератури

1. Кабаргина О. В. О законах частотного регулирования угловой скорости синхронных электродвигателей / О. В. Кабаргина, О. В. Никулин, В. А. Шабанов // Тинчуринские чтения: материалы докладов V Межд. науч. конф.: в 4 т. – Казань : Казан. гос. энерг. ун-т. – 2010. – Т. 3. – С. 63 – 64.

2. Кабаргина О. В. Возможности частотного регулирования угловой скорости синхронных электродвигателей / О. В. Кабаргина, О. В. Никулин, В. А. Шабанов // Электронные устройства и системы: межвуз. науч. сб. Уфа : УГАТУ. – 2010. – С. 285 – 290.

3. Куцик А. С. Аналіз режимів частотного регулювання синхронних електроприводів насосів / А. С. Куцик, М. Б. Семенюк, О. М. Нечай // Вісник Нац. техн. ун-ту “ХПІ”: зб. наук. пр. темат. вип.: Проблеми автоматизованого електроприводу. – Харків : НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 36. – С. 408 – 409.

4. Куцик А. С. Об'єктно-орієнтований метод аналізу електромеханічних систем / А. С. Куцик // Технічна електродинаміка. – 2006. – № 2. – С. 57 – 63.

5. Плахтына Е. Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем / Е. Г. Плахтына-Л. : Вища шк. изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 161 с.

6. Соколовський О. Ф. Напрямки енергозбереження в насосних установках / О. Ф. Соколовський // Вісник ЖДТУ. 3(Т.1). – 2008. – № 46. – С. 39 – 47.

7. Шабанов В. А. О законах частотного регулирования синхронных двигателей на нефтеперекачивающих станциях / В. А. Шабанов, О. В. Кабаргина // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2010. – 6 с. http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_2.pdf.

8. Bhatia R., Krattiger H.U., Bonanini A., et al, (1998), Adjustable Speed Drive with a Single 100-MW Synchronous Motor, *ABB Review*, No.6, pp.14 –20.

9. Bhatia R., Krattiger H., Bonanini A., Schafer D., Inge J.T., and Sydnor G.H. (1999), Adjustable Speed Drive Using a Single 135000 HP Synchronous Motor, *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp. 571 – 576.

10. Rossmann W.C., and Ellis R.G., (1998), Retrofit of 22 Pipeline Pumping Stations with 3000-hp Motors and Variable-Frequency Drives, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 34, Iss. 1, pp. 178 – 186.

Отримано 30.07.2014

References

1. Kabargina O.V., Nikulin O.V., and Shabanov V.A. O zakonah chastotnogo regulirovaniya uglovoj skorosti sinhronnykh jelektrodvigatelej [About a Law of Frequency Control of Synchronous Motor Speed], (2010), *Kazan State Energy Universitet Publ.*, Kazan, Russian Federation, pp. 63 – 64 (In Russian).

2. Kabargina O.V., Nikulin O.V., and V.A. Shabanov Vozmozhnosti chastotnogo regulirovaniya uglovoj skorosti sinhronnykh jelektrodvigatelej [The Possibility of Frequency Control of Synchronous Motors Speed], (2010), *Jelektronnye Ustrojstva i Sistemy: Mezhhuz. Nauch. Sb. Ufa Publ.*, Ufa, Russian Federation, pp. 285 –290 (In Russian).

3. Kutsik A.S., Semenyuk M.B., and Nechai O.M. Analiz rezhimiv chastotnogo reguluvannya sinkhronnikh elektropivodiv nasosiv [Analysis of Frequency Control Mode of Synchronous Electric Drive of Pumps], (2013), *Journal of Kharkov Polytechnic Institute Publ.*, Kharkov, Ukraine, Vol. 36, pp. 408 – 409 (In Ukrainian).

4. Kutsik A.S. Ob'ektno-orientovaniy metod analizu elektromekhanichnikh sistem [Object-oriented Analysis Method Electromechanical Systems], (2006), *Technical Electrodynamics Publ.*, Vol. 2, pp. 57 – 63 (In Ukrainian).

5. Plakhtyna E.G. Matematicheskoe modelirovanie elektromashinno-ventil'nykh sistem [Mathematical Modeling Electrical Machine and Gate Systems], (1986), *Lviv University Publ.* Lviv, Ukraine, 161 p. (In Russian).

6. Sokolovskii O.F. Napryamki energozbere-zhennya v nasosnikh ustanovkakh [Napryamki Energozbere-zhennya v Nasosnih Ustanovkakh], (2008), *Visnik Zhytomyr Publ.* Zhytomyr, Ukraine, Vol. 46, pp. 39 – 47 (In Russian).

7. Shabanov V.A., and Kabargina O.V. O zakonakh chastotnogo regulirovaniya sinkhronnykh dvigatelei na nefteperekachivayushchikh stantsiyakh [On the Laws of Frequency Control of Synchronous Motors for oil Pumping Stations], (2010), *Electronic Scientific Journal “Oil and Gas Business” Publ.*, 6 p. (In Russian), [url: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_2.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_2.pdf).

8. Bhatia R., Krattiger H.U., Bonanini A., et al, (1998), Adjustable Speed Drive with a Single 100-MW Synchronous Motor, *ABB Review*, No. 6, pp. 14 – 20 (In English).

9. Bhatia R., Krattiger H., Bonanini A., Schafer D., Inge J.T., and Sydnor G.H., (1999), Adjustable Speed Drive using a Single 135000 HP Synchronous Motor, *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp. 571 – 576 (In English).

10. Rossmann W.C., and Ellis R.G., (1998), Retrofit of 22 Pipeline Pumping Stations with 3000-hp Motors and Variable-Frequency Drives, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 34, Iss. 1, pp. 178 – 186 (In English).



Куцик

Андрій Степанович, д-р техн. наук, проф. каф. електроприводу і комп'ютеризованих електромеханічних систем НУ «Львівська політехніка», м. Львів, вул. Степана Бандери, 12. Тел. (032) 258 26 20.

E-mail: kutsyk@i.ua



Семенюк

Микола Борисович, канд. техн. наук, асистент каф. електроприводу і комп'ютеризованих електромеханічних систем НУ «Львівська політехніка», м. Львів, вул. Степана Бандери, 12, тел. (032) 258 26 20.

E-mail: mykola.semenyuk@gmail.com



Тутка

Василь Володимирович, канд. техн. наук, інж. Бурштинської ТЕС, м. Бурштин, вул. Калуська 10/76, Тел. 03438-43340.

E-mail: tutelli@mail.ru