



УДК 621.337:631.672

DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-28

ДИНАМІКА АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ В СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Білюк І. С., к. т. н.,
Бугрім Л. І., к. т. н.,
Гаврилов С. О., к. т. н.,
Кириченко О. С., к. т. н.,
Фоменко А. М., к. т. н.,
Шарейко Д. Ю., к. т. н.

*Національний університет кораблебудування імені адмірала
Макарова,*

e-mail: sergey.gavrilov81@gmail.com

Анотація – у роботі досліджено перехідні процеси в асинхронному електроприводі насосного агрегату з ПІД-подібним нечітким регулятором. Виконано порівняльний аналіз якості керування в системі з класичним та нечітким регуляторами. Обґрунтовано застосування нечіткого регулятора в асинхронному електроприводі насосного агрегату системи водопостачання та доведено, що використання нечіткої логіки призводить до підвищення якості перехідного процесу системи. Моделювання проведено за допомогою пакету прикладних математичних програм Scilab.

Ключові слова: нечітка логіка, регулятор, асинхронний електропривод, мережевий насос, моделювання, перехідна характеристика.

Постановка проблеми. Одним з основних завдань керування насосними агрегатами систем водопостачання та водовідведення є стабілізація статичного напору в системі. Необхідність стабілізації напору в цих системах обумовлена змінним характером режиму водоспоживання, що вимагає безперервних змін в режимі роботи насосних агрегатів. Крім того, при побудові керування електропривода систем водопостачання нерідко виникає проблема неточного або неповного опису об'єкта керування, що не дає можливості здійснити коректне налаштування класичних ПІД-регуляторів напору і забезпечити задану якість регулювання, ускладнює керування, обмежує швидкодію, вимагає застосування модифікованих алгоритмів керування.

© Білюк І. С., Бугрім Л. І., Гаврилов С. О., Кириченко О. С., Фоменко А. М.,
Шарейко Д. Ю.



У зв'язку із вищевикладеним, інтерес становить дослідження керування асинхронного електропривода систем водопостачання з використанням алгоритмів нечіткої логіки, які останнім часом набувають поширення серед інтелектуальних технологій формування адаптивних алгоритмів регулювання та керування в області електропривода.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У вітчизняних та зарубіжних літературних джерелах, які присвячені питанням дослідження режимів роботи електроприводів систем водопостачання, в більшості випадків розглядаються окремо регульований електропривод насоса або безпосередньо мережевий насос. В обох випадках спрощується процес дослідження, але не враховуються координати насоса чи відсутня прив'язка до керованого електропривода. Тенденцією останнього часу є розгляд системи електропривода і насоса як єдиного технологічного агрегату [1-3].

Як показують дослідження, сьогодні існує потреба у створенні адаптивних алгоритмів керування електропривода насосних агрегатів для підтримки стабільного напору в системі водопостачання [4]. Тому в регульованому електроприводі систем водопостачання почали активно впроваджуватися методи і технічні засоби, засновані на нечіткій логіці [5, 6]. Показники якості перехідних процесів з використанням нечітких регуляторів не поступаються показникам якості відповідних класичних регуляторів, а в деяких випадках і перевищують їх [7-9].

Проте на сьогодні відсутні відомості щодо дослідження використання нечітких регуляторів в асинхронному електроприводі мережевих насосів з урахуванням робочих параметрів насоса, таких як витрата, напір та момент статичного опору.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження динаміки асинхронного електропривода мережевого насоса з ПД-подібним нечітким регулятором. Для досягнення поставленої мети в роботі потрібно розв'язати наступні завдання: побудувати модель асинхронного електропривода мережевого насоса та виконати синтез ПД-подібного нечіткого регулятора; провести моделювання системи керування електропривода з ПД-подібним нечітким регулятором в Scilab; виконати порівняльний аналіз роботи асинхронного електропривода мережевого насоса з класичним і нечітким регуляторами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Імовірнісний характер водоспоживання вимагає безперервних змін в режимі роботи насосних агрегатів систем водопостачання. Зміни повинні бути

здійснені таким чином, щоб підтримувалися необхідні значення технологічних параметрів (витрати, напору) в системі в цілому і одночасно забезпечувалося мінімально можливе енергоспоживання насосної установки. Це завдання вирішується системою автоматичного регулювання, яка стабілізує напір в мережі по заданому значенню. Стабілізувати напір у всіх точках складної розгалуженої мережі практично неможливо. Тому зазвичай йдеться про стабілізацію напору в окремих точках мережі, які звать диктувальними (рисунок 1) [10]. Сигнали від датчика тиску, встановленого в диктувальній точці мережі, і від задавального пристрою надходять до регулятора напору, де вони порівнюються між собою, відповідним чином обробляються і потім передаються в систему керування електропривода насосного агрегату.

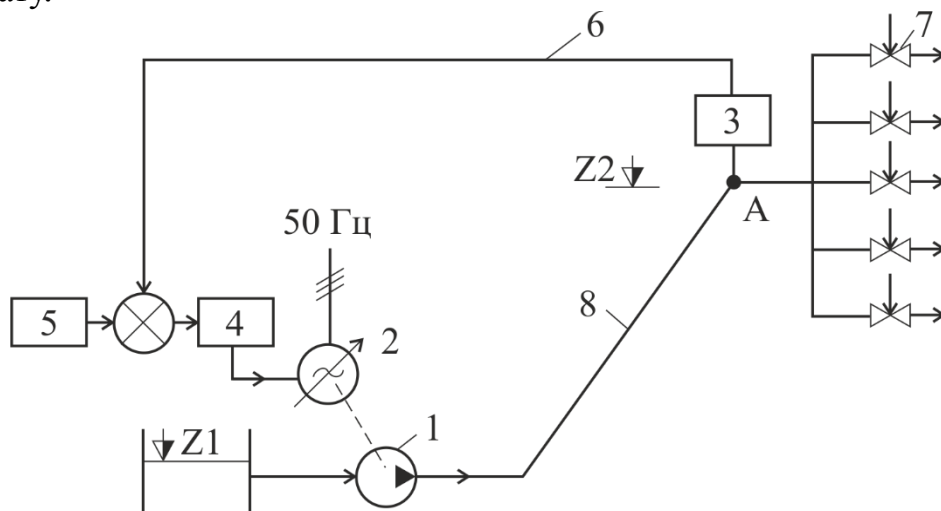


Рис. 1. Принципова схема стабілізації напору в диктувальній точці А:
1 – відцентровий насос; 2 – регульований електропривод;
3 – датчик тиску; 4 – регулятор напору; 5 – задавальний пристрій;
6 – канал зв'язку; 7 – водорозподільні пристрої; 8 – водовід.

З енергетичної точки зору найбільш ефективним способом узгодження режимів подачі насосних агрегатів і споживання рідини є регулювання частоти обертання робочих коліс. Частота обертання може бути змінена різними способами, однак, для побудови систем автоматичного керування насосними установками найбільш зручним і ефективним є використання регульованого електропривода [1].

В якості об'єкта керування в роботі розглянуто насосну станцію 3 NKVE 15/8 Т, яку призначено для підвищення тиску води цивільного, сільськогосподарського та промислового призначення. Насосна станція компонується 3 вертикальними багатоступінчастими

відцентровими насосами типу NKVE 15, кожен з яких укомплектовано асинхронним електродвигуном MDEMA XX 132-2 2.

Для проведення досліджень було побудовано імітаційну модель системи в програмі Xcos пакету прикладних математичних програм Scilab [11, 12]. Модель складається зі стандартних блоків палітри інструментів Xcos та додаткового модуля sciFLT Toolbox [13]. Всі параметри моделі системи стабілізації напору розраховано для обраного об'єкту керування за методиками, які наведено в роботах [1, 14]. Однак дана модель може бути використана для будь-якого насосного агрегату при зміні вихідних даних.

В моделі насосного агрегату умовно можна виділити електромеханічну (рис. 2) та механічну частини. До електромеханічної частини відносять регульований електропривод, а до механічної – мережевий насос [1].

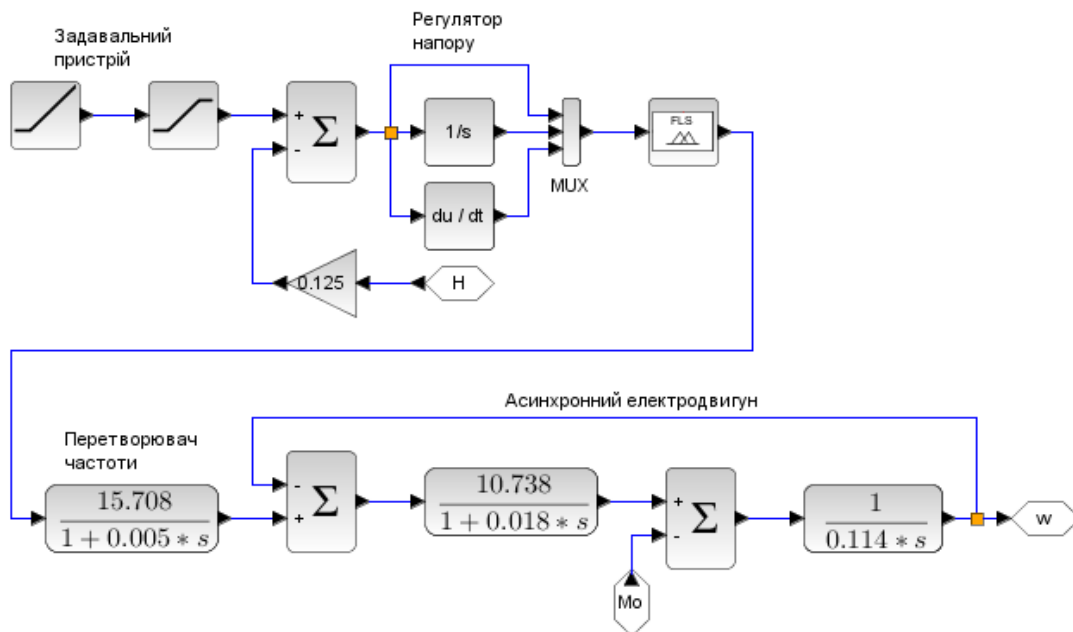


Рис. 2. Модель електромеханічної частини насосного агрегату

До складу електромеханічної частини моделі входять: задавальний пристрій (блоки Ramp та Saturation); суматор сигналів завдання за напором та зворотнього зв'язку за напором Н (блок Summation); ПІД-подібний нечіткий регулятор напору (Integral_f, Deriv, Mux та блок системи нечіткого виведення scicos_fls); перетворювач частоти, який реалізовано аперіодичною ланкою Clr; асинхронний електродвигун представлено в спрощеному вигляді, як аперіодична ланка другого порядку (Summation, блок моменту на аперіодичній ланці першого порядку Clr, суматор електромагнітного моменту двигуна та моменту статичного опору Мо, створюваного

насосом, блок швидкості двигуна на ланці Clr). Вихідна координата електропривода – кутова швидкість w .

В даній роботі нечітку логіку в ПІД-регуляторі напору використано для організації автоматичного підстроювання коефіцієнтів класичного ПІД-регулятора. Такий підхід виявляється більш зручним у зв'язку з простотою використання, ніж адаптивне керування або застосування ускладнених регуляторів стану.

Коефіцієнти пропорційної (kP), інтегральної (kI) та диференціальної (kD) складових класичного регулятора напору попередньо розраховано за умови налаштування контуру стабілізації напору на технічний оптимум.

Систему нечіткого виведення (блок scicos_fls, рис. 2) виконано за типом Mamdani з трьома вхідними та одним вихідним параметрами (рис. 3). Три вхідні параметри (Inputs): для пропорційної (kP), інтегральної (kI) та диференціальної (kD) складових регулятора напору. Вихідний параметр (Outputs) являє собою сигнал керування (y).

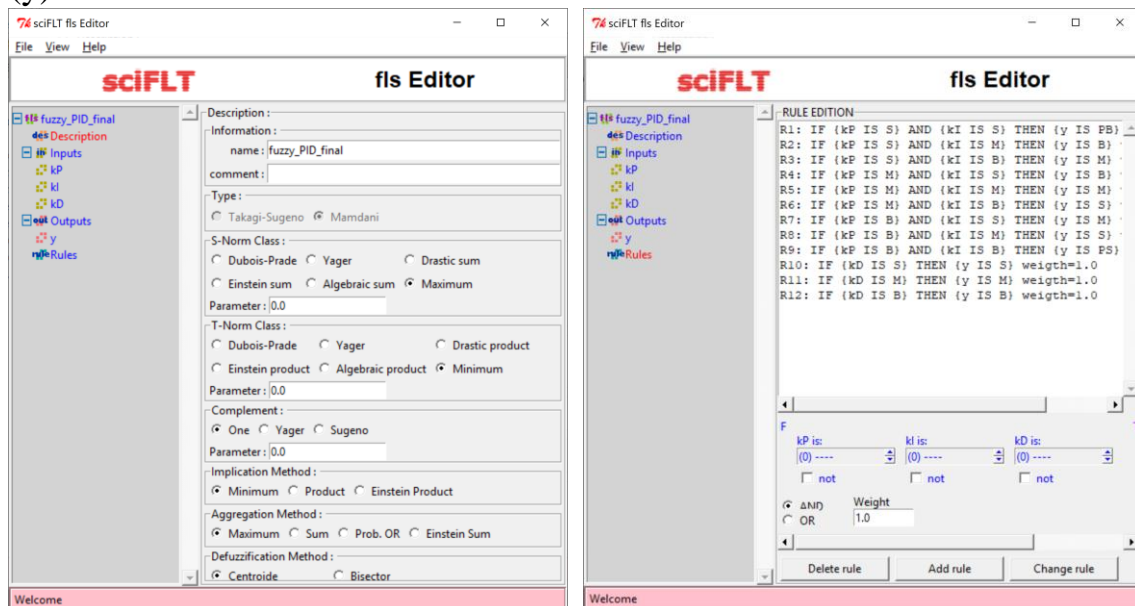


Рис. 3. Опис системи та редактор правил нечіткого виведення в sciFLT

Процедура обробки вхідної інформації в нечіткому регуляторі може бути описана наступним чином: поточні значення вхідних змінних kP, kI та kD перетворюються в лінгвістичні значення (фазифікація); на підставі отриманих лінгвістичних значень і з використанням бази правил (Rules) здійснюється нечітке логічне виведення, в результаті якого обчислюються лінгвістичні значення вихідної змінної y ; дефазифікація.

Для реалізації процедур фазифікації і дефазифікації задаються функції приналежності для кожного вхідного та вихідного параметрів. Визначення функції приналежності – найбільш трудомісткий процес, який визначає якість процесу керування системою. Так, для складання найбільш адекватної моделі, потрібно не тільки знання характеру поведінки системи в цілому, а й певне число експериментів, що дозволяють визначити недоліки нечіткої моделі і усунути їх. Функції приналежності для всіх термів вибираються трикутної форми. Застосування інших форм в такій системі досить слабо впливає на результат.

Для побудови моделі насоса в програмі Xcos складено схеми, які реалізують функціональні залежності робочих параметрів мережевого насоса: $Q=f(\omega)$, $H=f(\omega)$ та $M_o=f(\omega)$.

В роботі [1] наведено залежності для обчислення витрати, напору та статичного моменту насоса. Так залежність витрати насоса від його кутової швидкості $Q=f(\omega)$ має вигляд

$$Q = Q_n \cdot \sqrt{\frac{H_\phi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - H_c}{H_\phi - H_c}}, \quad (1)$$

де Q_n , ω_n – номінальні витрата та кутова швидкість насоса; H_ϕ – фіктивне значення напору при нульовій витраті (визначається за напірною характеристикою насоса); ω – поточне значення кутової швидкості насоса; H_c – статичний напір насоса.

Статичний напір насоса змінюється у відповідності до виразу

$$H_c = \frac{H - H_n \cdot \left(\frac{Q_{\text{витр}}}{Q_n}\right)^2}{1 - \left(\frac{Q_{\text{витр}}}{Q_n}\right)^2}, \quad (2)$$

де H – напір, що створюється насосом; H_n – номінальний напір насоса; $Q_{\text{витр}}$ – витрата рідини в гідросистемі.

Схему моделі насоса, яка реалізує функціональну залежність $Q=f(\omega)$ представлено на рис. 4.

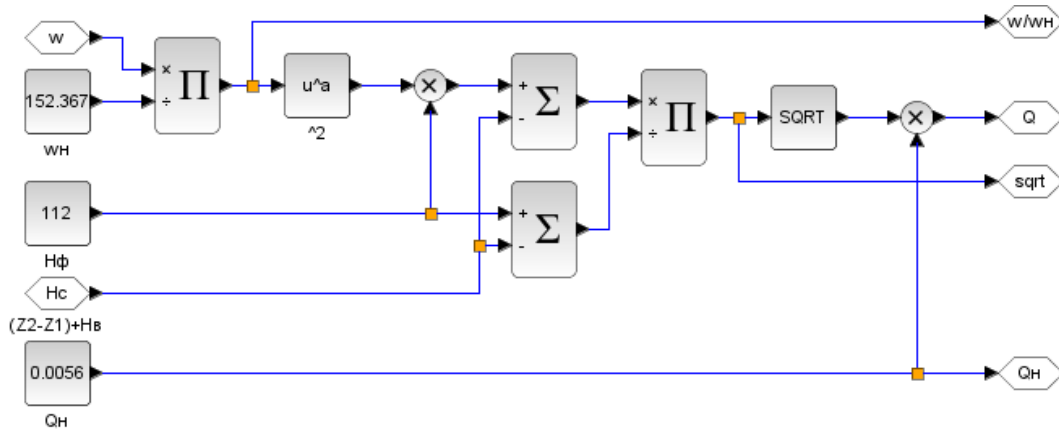


Рис. 4. Схема моделі за формулою (1)

Залежність напору насоса від його кутової швидкості $H=f(\omega)$ визначається за формулою

$$H = H_c + \frac{(H_n - H_c) \cdot \left(H_\phi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - H_c \right)}{H_\phi - H_c} \quad (3)$$

Схему моделі насоса, яка реалізує функціональну залежність $H=f(\omega)$ представлено на рис. 5.

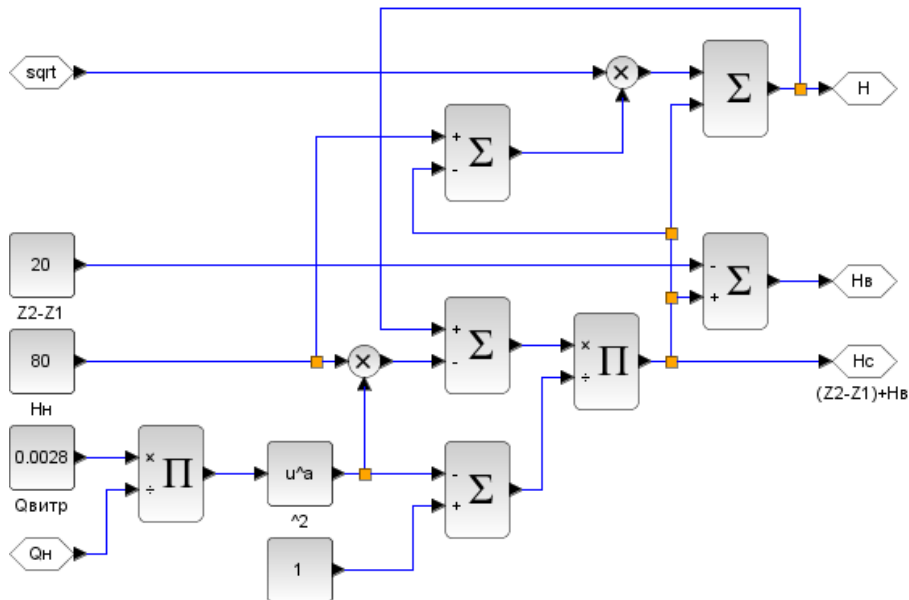


Рис. 5. Схема моделі за формулами (2) та (3)

Момент статичного опору, який створюється насосом $M_0=f(\omega)$

$$M_o = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\omega \cdot \eta_{нас}}, \quad (4)$$

де ρ – щільність рідини, що перекачується; g – прискорення вільного падіння; $\eta_{нас}$ – ККД насоса.

ККД насоса в залежності від кутової швидкості насоса визначається за формулою

$$\eta_{нас} = 1 - \frac{1 - \eta_n}{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^{0,36}}, \quad (5)$$

де η_n – номінальний ККД насоса.

Схему моделі насоса, яка реалізує функціональну залежність $M_o=f(\omega)$ представлено на рис. 6.

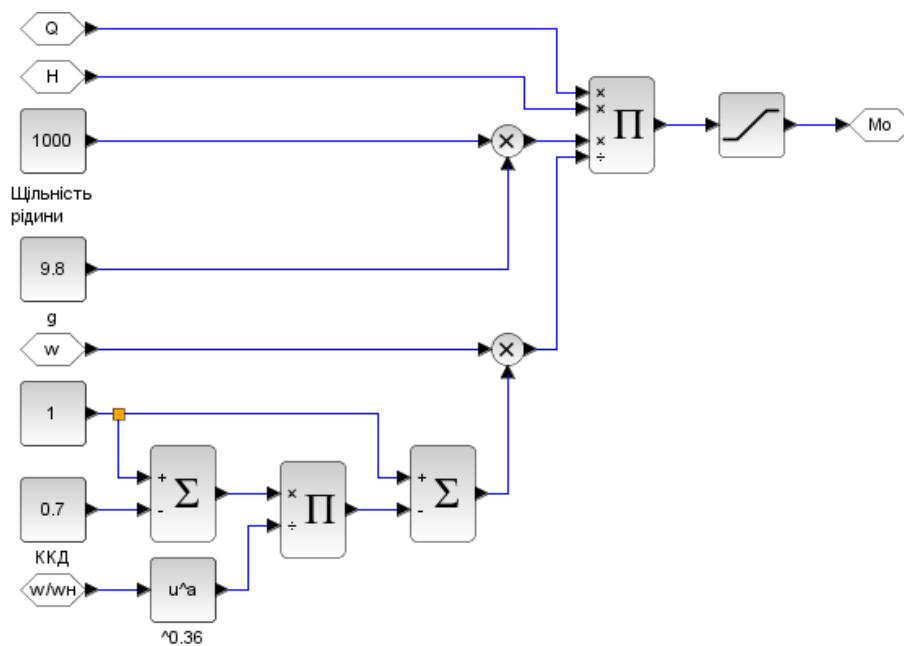
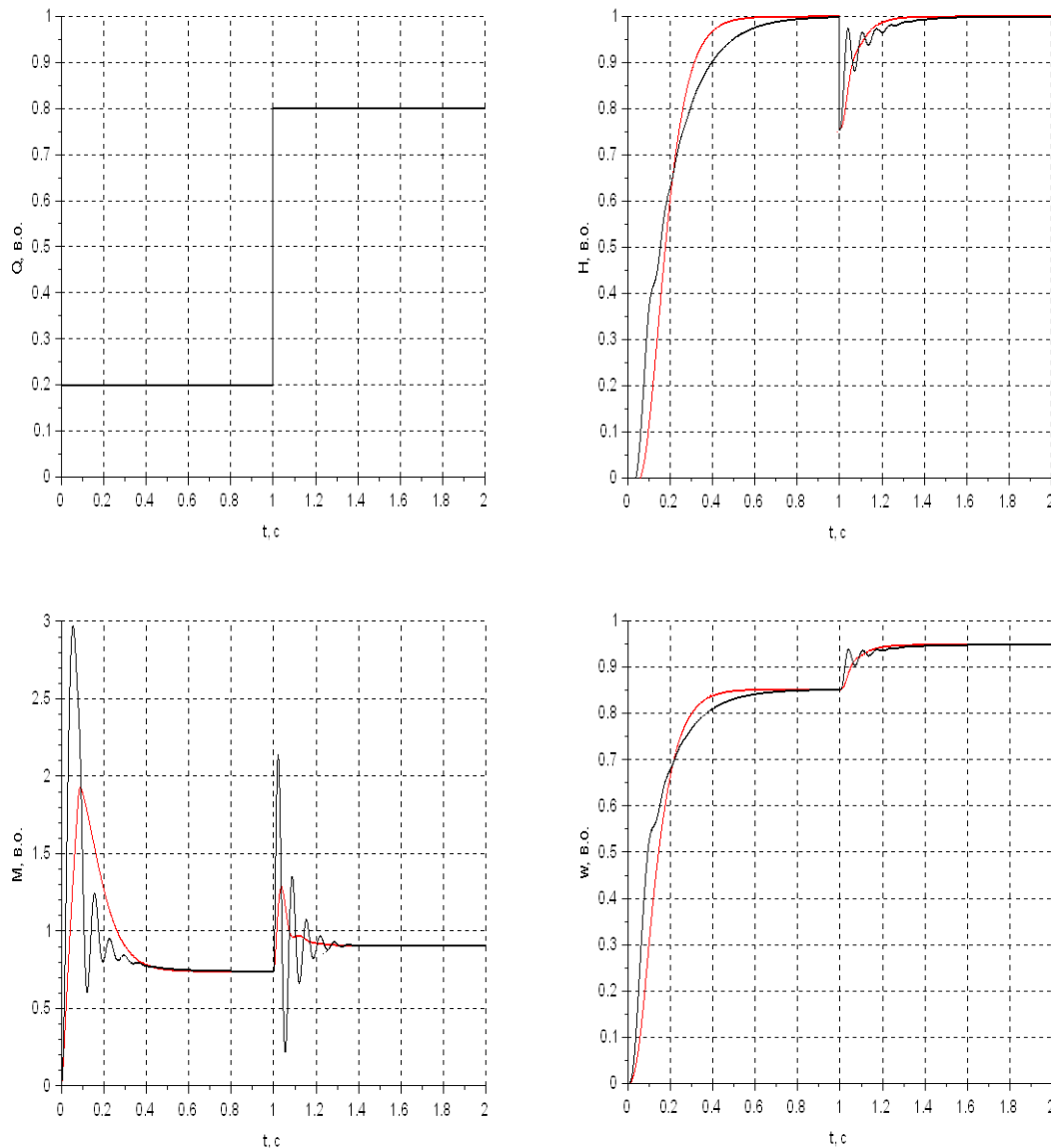


Рис. 6. Схема моделі за формулами (4) та (5)

Для систем керування важливим є поняття якості перехідних процесів, тобто важливий характер протікання процесів, особливо такі фактори, як тривалість, коливальність і динамічне відхилення регульованої змінної від заданої величини. Перехідні характеристики досліджуваної моделі асинхронного електропривода мережевого насоса з класичним і нечітким регуляторами при зміні витрати в гідросистемі наведено на рис. 7.



- з класичним ПІД-регулятором;
- з ПІД-подібним нечітким регулятором

Рис. 7. Перехідні характеристики системи

За результатами аналізу якості керування по перехідних характеристиках можна зробити висновок, що асинхронний електропривод з нечітким регулятором має більш високі динамічні показники щодо системи із класичним ПІД-регулятором. Отримані результати підтверджують доцільність та ефективність застосування нечітких ПІД-подібних регуляторів напору в асинхронному електроприводі систем водопостачання.



Висновки. В представленій роботі побудовано модель асинхронного електропривода з нечітким регулятором системи водопостачання, яка дозволяє визначати робочі параметри, аналізувати електромеханічні, енергетичні процеси та досліджувати динаміку асинхронного електропривода при зміні режимів роботи насосного агрегату. Результати імітаційного моделювання в пакеті прикладних математичних програм Scilab показали доцільність застосування нечіткої логіки в структурі класичних ПІД-регуляторів асинхронного електропривода систем водопостачання та підтвердили перспективність такого підходу. Використання методів теорії нечіткої логіки при синтезі регулятора напору дозволяє зробити процес керування більш адаптивним. Запропонований алгоритм синтезу системи нечіткої логіки регулятора напору за допомогою модуля sciFLT рекомендовано до практичного використання.

Список використаних джерел

1. *Фащиленко В. Н.* Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: учеб. пособие. Москва: Горная книга, 2011. 260 с.
2. Моделирование технологических режимов работы насосных установок с частотно-регулируемым электроприводом / А. В. Чермалых, И. Я. Майданский, О. Б. Доценко, Ю. И. Затирка. *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика.* 2014. Вип. 1 (2). С. 49-52.
3. *Барабанов В. Г., Гаврилов Д. П.* Разработка и исследование системы управления насосной установкой. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение.* 2017. Т. 17, № 2. С. 11-19.
4. Адаптивный энергосберегающий алгоритм управления для преобразователей частоты привода насосов системы водоснабжения / Д. М. Таранов и др. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета.* Краснодар: КубГАУ, 2014. № 2 (096). С. 117-128. URL: <http://ej.kubagro.ru/2014/02/pdf/10.pdf> (дата звернення: 02.02.2019).
5. *Jin J., Huang H.* Study on fuzzy self-adaptive PID control system of biomass boiler drum water. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems.* 2013. Vol. 3, № 1. P. 93-98.
6. *Есилевский В. С., Кузнецов В. Н., Уварова Л. В.* Минимизация энергозатрат на управление насосными станциями путем



использования регуляторов с нечеткой логикой. *Сантехника. Водоснабжение. Водоотведение*. 2009. № 1. С. 64-70.

7. Динамика электропривода с нечетким регулятором / С. В. Ланграф и др. *Известия Томского политехнического университета*. 2010. Т. 316, № 4. С. 168-173.

8. Исследование классических и нечетких ПИД-регуляторов для нестационарных объектов управления / В. И. Копылов, Д. И. Муравьев, В. Г. Коломыцев, Г. И. Рустамханова. *Фундаментальные исследования*. 2016. № 11. С. 532-536.

9. Моделирование регулятора на базе нечеткой логики для управления турбогенератором / А. Г. Бикметов и др. *Современные наукоемкие технологии*. 2017. № 4. С. 23-27.

10. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоподувных установках. Москва: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.

11. *Campbell S. L., Chancelier J.-P., Nikoukhah R. Modeling and Simulation in Scilab/Scicos with ScicosLab 4.4*. New York: Springer, 2009. 332 p.

12. *Leros A., Andreatos A. Using Xcos as a Teaching Tool in a Simulation course*. *WORLD-EDU'12/CIT'12: Proceedings of the 6th international conference on Communications and Information Technology, and Proceedings of the 3rd World conference on Education and Educational Technologies*. 2012. P. 121-126.

13. Fuzzy Logic Toolbox. Atoms: Homepage. URL: <https://atoms.scilab.org/toolboxes/sciFLT/0.4.7> (Last accessed: 02.02.2019).

14. *Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов*. Москва: Академия, 2005. 300 с.

ДИНАМИКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С НЕЧЕТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Билюк И., Бугрим Л., Гаврилов С., Кириченко О., Фоменко А., Шарейко Д.

Аннотация – в работе исследованы переходные процессы в асинхронном электроприводе насосного агрегата с ПИД-подобным нечетким регулятором. Выполнен сравнительный анализ качества управления в системе с классическим и нечетким регуляторами. Обосновано применение нечеткого регулятора в асинхронном электроприводе насосного агрегата системы водоснабжения и доказано, что применение нечеткой логики приводит к повышению качества



переходного процесса системы. Моделирование проводилось с помощью пакета прикладных математических программ Scilab.

Ключевые слова: нечеткая логика, регулятор, асинхронный электропривод, сетевой насос, моделирование, переходная характеристика.

DYNAMICS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH FUZZY CONTROLLER FOR WATER SUPPLY SYSTEMS

**I. Biliuk, L. Buhrim, S. Havrylov, O. Kyrychenko, A. Fomenko,
D. Shareiko**

Summary

The results of researching dynamics of an asynchronous electric drive with fuzzy controller of water supply systems are presented in this paper. The model of the asynchronous electric drive of network pump with stabilization of pressure in the hydraulic system has been built. The model structure contains electromechanical and mechanical parts. The electromechanical system is an asynchronous frequency control drive with fuzzy controller of pressure, a mechanical one is a line pump. The presented structure of the model allows to determine operating parameters; analyze the electromechanical, energy processes; explore the dynamics of an asynchronous electric drive when the operating modes of the pump unit are changed. In addition to that, it is possible to assess the energy-efficient aspects of an adjustable electric drive with fuzzy logic in water supply systems usage. This model can be used for any pump unit with a change in the source data. Synthesis of a fuzzy PID-controller is realised using the sciFLT fuzzy logic system development module. A knowledge base of fuzzy controller has been developed. The application of methods based on the fuzzy logic theory in the controller of pressure allows to make control process more adaptive. A synthesis algorithm of fuzzy logic system for a pressure controller using the sciFLT module is proposed. The algorithm is recommended for practice. Simulation of an asynchronous electric drive with fuzzy PID-controller has been carried out in the Xcos program of the Scilab software package. The transient characteristics of an asynchronous electric drive of a pump unit with fuzzy PID-controller of pressure are built and the quality of control has been assessed. A comparative analysis of the quality of control in the system with classical and fuzzy controllers has been done. The application of this fuzzy controller of pressure in an asynchronous electric drive of a pump unit of water supply systems is validated and it is proved that employment of fuzzy logic increases the quality of time response process in system.

Key words: fuzzy logic, controller, asynchronous electric drive, network pump, simulation, step response.