

УДК 621.3

Горобець А.М.

Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

ЧАСТОТНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ПРИВОДУ СИСТЕМИ ЗВОРОТНЬООСМОТИЧНОГО ОПРІСНЕННЯ ВОДИ

Анотація. В результаті проведених досліджень було змодельована систему автоматичного керування насосом високого тиску в системі зворотного осмосу, а також побудовані регульовальні характеристики, згідно яких слід зазначити ефективність частотного регулювання для установки опріснення води відносно способу використання декількох установок меншої потужності, які працюють при номінальних параметрах.

Ключові слова: автоматизована система керування, енергоефективність, частотне регулювання електроприводу, зворотній осмос.

Abstract. As a result of the research, the system of automatic control of the high-pressure pump in the reverse osmosis system was modeled, and the control characteristics were constructed, according to which the efficiency of frequency control for water desalination installation

Key words: automated control system, energy efficiency, frequency control of the electric drive, reverse osmosis.

Вступ. Однією з головних проблем Півдня України, зокрема зони сухого степу, де середньорічні норми опадів ледве перевищують 300 мм, є нестача прісної води високої якості. Ситуація погіршується тим, що сухий степ в прибережній зоні Чорного моря характеризується великими запасами підземних вод із високою загальною мінералізацією від 1 до 35 г/л [1].

Але до недавнього часу велика частина електроприводів зазначених механізмів були нерегульованими. Традиційні способи регулювання подачі на насосних установках полягають у дроселюванні напірних ліній і зміні загального числа працюючих агрегатів. Такі способи регулювання спрямовані на рішення технологічних задач і фактично не враховують енергетичних аспектів транспорту води.

Мета та завдання. Дослідження гідравлічних та електромеханічних характеристик системи зворотньоосмотичного опріснення води з частотнорегульованим приводом насоса високого тиску та оцінки енергоефективності роботи такої насосної установки.

Матеріал та результати дослідження. Центральним механізмом 3О установки опріснювальної установки є відцентровий багатоступінчатий насос високого тиску [2].

При використанні дросельних елементів відбувається розподіл напору на елементах системи. Для підтримки заданого тиску в мережевому трубопроводі при зміні витрати рідини доводиться змінювати гідравлічний опір регулюючого елемента. При цьому загальна гідравлічна характеристика буде мати більш крутий вигляд. Величина втрат енергії з таким регулюванням неухильно збільшується. Таким чином, чим глибше проводиться дроселювання регулюючим елементом, тим більше енергетичних втрат має весь технологічний процес. Зміна частоти обертання робочого колеса насосної установки дозволяє здійснити безперервне регулювання продуктивності насоса із меншими витратами енергії, ніж у попередньому варіантах. Однак воно вимагає більших витрат на регулююче устаткування, особливо для установок з потужністю вище середньої, і приводить до погіршення електромагнітної сумісності з мережею живлення.

Для моделювання було обрано систему з насосом високого тиску CR 64-4-1 потужністю 22 кВт. В розглянутій системі для потрібної динаміки перехідних процесів і

моменту наближеної до реальної (рис 3). Статичний момент насосу визначається наступною залежністю:

$$M_c(\omega) = M_{xx} - k_{п.р.} \cdot \omega + \beta \cdot \omega^2 \quad (1)$$

де, β – в'язкість рідини, що перекачується (Кv). $k_{п.р.}$ – коефіцієнт, що характеризує нерівномірність потоку рідини; M_{xx} – момент холостого ходу, приймається в межах 5-10% від номінального.

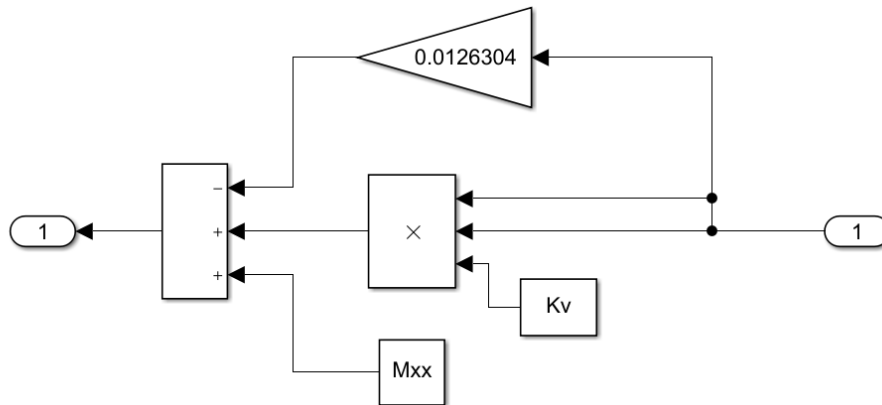


Рисунок 3 – Параметри підсистеми M_c

Результати моделювання показані на рис 4 та рис 5.

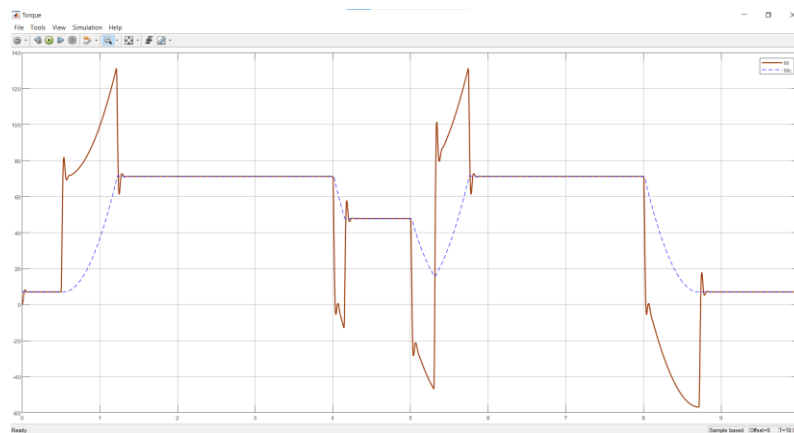


Рисунок 4 –Графік перехідних процесів по моменту на валу установки та статичного моменту

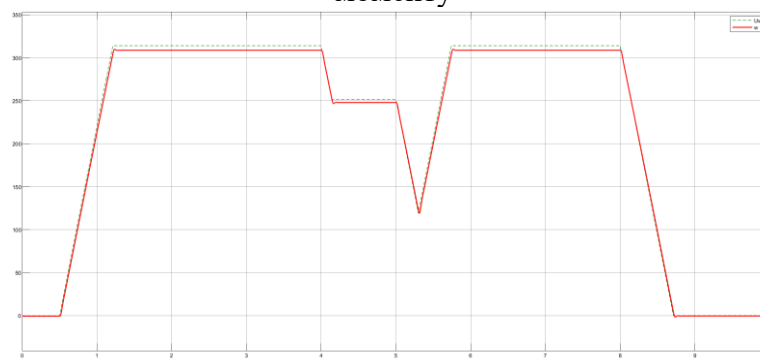


Рисунок 5 – Графік перехідних процесів по швидкості на валу установки та статичного моменту

Аналізуючи дані графіки можемо зробити наступні висновки: пуск і гальмування системи по швидкості відбувається плавно згідно заданої швидкості. По моментові з'являються пульсації (+0.03Нм) при постійному статичному моменту, а при пуску та гальмування відбуваються значні викиди динамічного моменту, але менші ніж максимально допустимий момент. Тому установка добре відпрацьовує заданий алгоритм при ustalених режимах і перехідних процесах.

У разі відсутності впливу кавітації на роботу насоса зміна частоти обертання електродвигуна буде супроводжуватися зміною характеристик насоса відповідно до законів подібності: продуктивність Q пропорційна відношенню частоти обертання; манометричний тиск H пропорційний відношенню частоти обертання в квадраті; Потужність N пропорційна відношенню частоти обертання в кубі [3].

Вплив вхідного тиску на продуктивність установки: тиск вихідної води, яка подається на зворотньоосмотичні (ЗО) мембрани, впливає як на питомий потік пермеата, так і на відведення концентрату від мембран. Питомий потік пермеата через мембрану збільшується в прямо пропорційній залежності від підвищення тиску вихідної води. Зростання тиску вихідної води також призводить до підвищення солезатримки, але ця залежність нелінійна.

Вплив температури вихідної води: показники мембран виробники зазвичай приводять для стандартної температури 25°C (298°K). Продуктивність мембран дуже чутлива до змін температури вихідної води. Коли температура води збільшується, питомий потік пермеата збільшується майже лінійно, в основному через більш високої швидкості дифузії води через мембрану. Залежність швидкості питомої потоку пермеата від температури описується через поправочний коефіцієнт температури - TCF (Temperature Correction Factor) через такий вираз:

$$TCF = e^{(K \cdot (1 / (273 + t) - 1/298))} \quad (2)$$

де, K – характеристична постійна для матеріалу ЗО-мембрани, t – температура вихідної води в градусах Цельсія.

Для інженерних розрахунків можна використовувати наступну аксіому: на один градус зміни температури вихідної води зміна питомої швидкості потоку пермеата становить близько 3% від номінального значення. З іншого боку, здатність мембран витримувати підвищені температури збільшує область їх застосування, а також вона важлива під час операцій очищення, оскільки дозволяє використовувати більш жорсткі і швидкі процеси очищення.

Тобто зміна тиску, температури чи мінералізації вихідної води приведе до зміни продуктивності установки. Оскільки вихід пермеату майже незмінний і становить 75%, то витрата вхідної води також прямопропорційна виходу пермеату. При побудові напірних характеристик при знаходженні робочих точок слід врахувати, що зміна вихідних параметрів води призведе до зміни перепаду тиску на мембранному елементу і як наслідок зміни опору мережі трубопроводу.

Механічні характеристики (залежність швидкості на валу від моменту) частотнорегульованого електроприводу будуються за формулою:

$$M(n) = \frac{\sqrt{3} \cdot U_1^2 \cdot r_2'}{2\pi f_1 \cdot (60f_1 - n) \cdot \left(\left(r_1 + \frac{60f_1 \cdot r_2'}{60f_1 - n} \right)^2 + (2\pi f_1 L_e)^2 \right)} \quad (3)$$

Для скалярного управління турбомеханізмами було використано закон Костенка (рис. 6) - $U/f = \text{const}$. Розглянуто та побудовано характеристики при частотах 50, 40, 25 та 10 Гц., задаючись значеннями ковзання від 0 до 1 з кроком 0,01 в середовищі MathCAD.

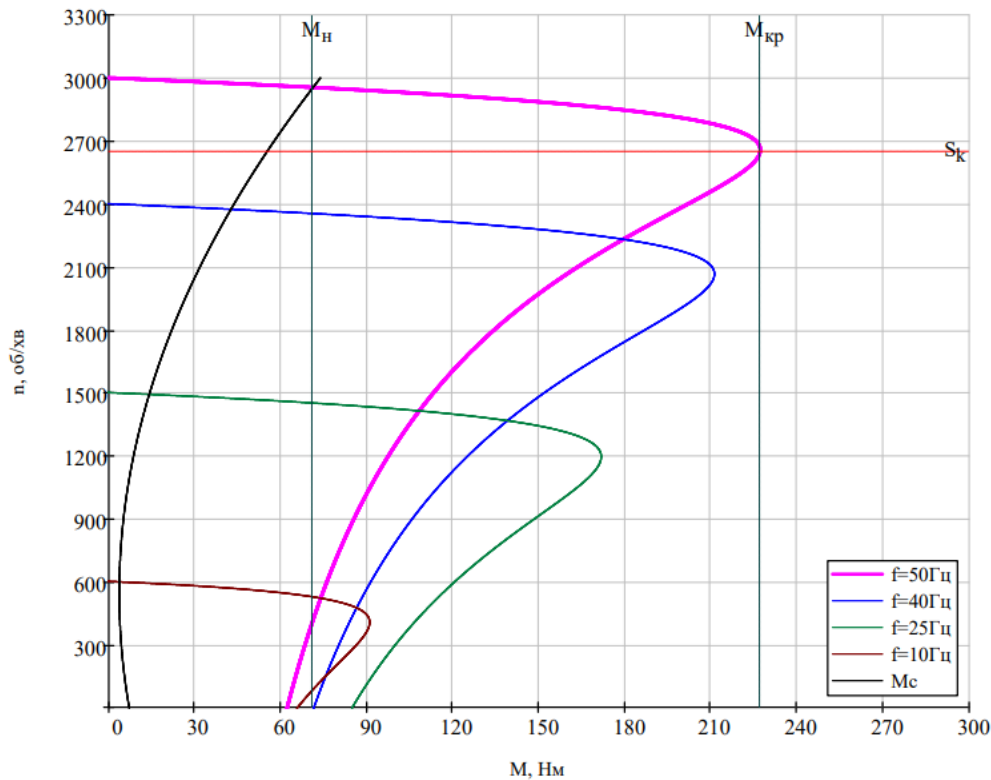


Рисунок 6 – Характеристики двигуна MG180 при одночасній зміні частоти мережі та напруги

Для побудови характеристика насоса необхідно задатись 8 точками при номінальній частоті з заводських графіків та враховуючи залежність подачі від напору (5) і використовуючи апроксимацію в середовищі MathCAD було отримано характеристику насосу CR64-4-1 при врахуванні вхідного в насос тиску 2 бар.

$$H(Q) = H_0 + a \cdot Q - b \cdot Q^2 \quad (5)$$

де, H_0, a, b – коефіцієнти полінома.

Використовуючи теорію подібності та природню характеристику насосу було отримано формулу напірної характеристики для різних частот:

$$H_f(Q) = 20 + 105.4964 \cdot \frac{f^2}{f_1^2} + 0.1935 \cdot Q \cdot \frac{f}{f_1} - 8.5114 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2 \quad (6)$$

Згідно даних характеристик і характеристики мережі будуються напірні характеристики (рис.7) при частотному регулюванні. На характеристиці вказуються межі оптимального регулювання дроселюванням (отримуються з заводських графіків), адже одночасне використання цих двох методів регулювання дозволяє розширити діапазон регулювання. Також враховано, що мембранні елементи не будуть працювати

при тиску меншому ніж 1,58 бар при заданій температурі і мінералізації. Проте подача на вхід насосу води під тиском 2 бар нівелює цю границю.

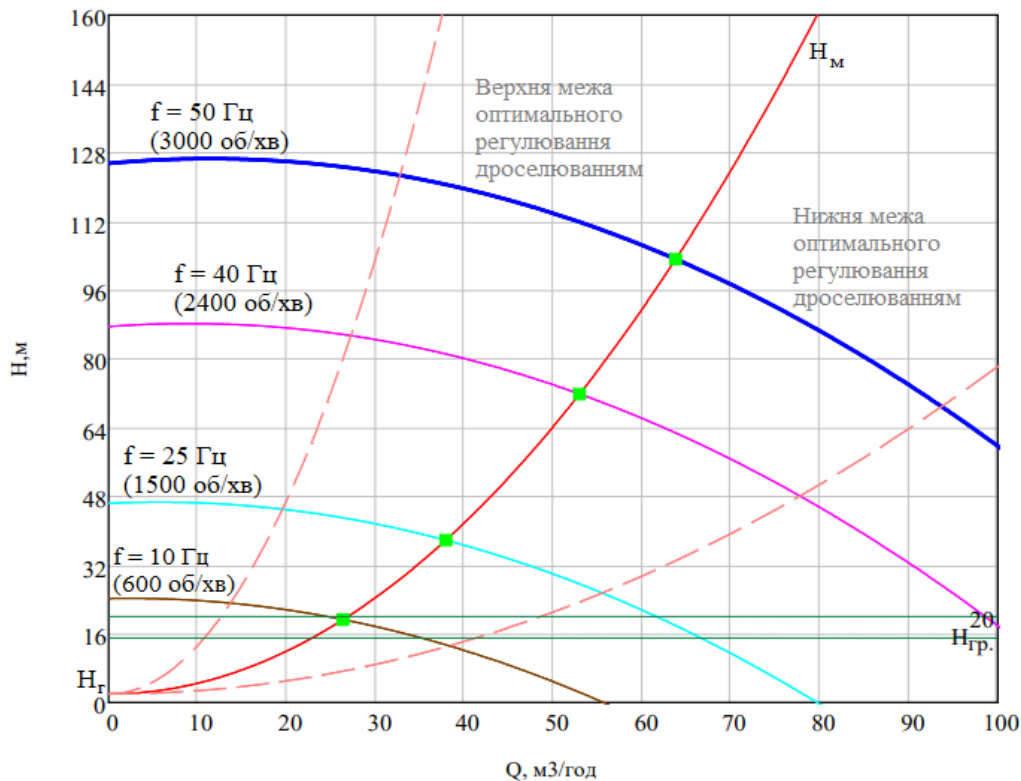


Рисунок 7– Напірні характеристики установки

Висновки. На основі структурної схеми досліджена система керування насосом високого тиску в системі зворотнього осмосу, а також побудовані регульовальні характеристики, згідно яких слід зазначити ефективність частотного регулювання для установки опріснення води відносно способу використання декількох установок меншої потужності, які працюють при номінальних параметрах. Але установка частотного перетворювача і відповідних регуляторів потребує значних вкладень, і є доцільним для установок середньої та великої потужностей (від 22 кВт).

Перелік посилань

1. Трус, І. М., Гомеля, М. Д., Воробйова, В. І., Іваненко, О. І., & Сенькова, К. С. (2020). Розробка технологій опріснення високомінералізованих вод. *Сучасний рух науки: тези доповідей X Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 2-3 квітня 2020 р., Том 2*.
2. Устименко, Д. В., & Никитенко, А. В. (2011). Эффективность внедрения систем с частотно-управляемыми электроприводами насосов. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*, (37), 116-119.
3. Хованський, С. О. (2010). Підвищення ефективності експлуатації відцентрових насосів у системі водопостачання житлово-комунального господарства.

Науковий керівник: д.т.н. професор Розен В.П.