

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВОДОПОДАЧІ ТА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НА ЗРОШУВАЛЬНОМУ ТЕХНОЛОГІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ

В.М. ПОПОВ, М.М. ТАРГОНІЙ

Інститут водних проблем і меліорації НААН

Наведено математичну модель для аналізу процесів водоподачі та електроспоживання на зрошувальному технологічному комплексі (ЗТК) «насосна станція – закрита зрошувальна мережа – поливна техніка», розроблену із застосуванням програми MATLAB/Simulink. Модель складається із типових ланок структурної схеми – передавальних функцій та математичних залежностей, параметри яких визначено за результатами аналізу гідравлічних процесів та енергетичних характеристик при проведенні експериментальних досліджень та енергоаудиту на ЗТК.

Ключові слова: відцентровий насос, закрита зрошувальна мережа, дощувальна машина, модель, перехідний процес, енерго-ефективність

Вступ. Розробка та впровадження енергоефективних технологій управління водоподачею на ЗТК є одним із найважливіших завдань для сталого розвитку зрошувального землеробства в Україні. Щорічно підкачувальними насосними станціями (НС) закритих зрошувальних систем витрачається близько 500 млн кВт. год. електроенергії.

Аналіз досліджень та публікацій. Для обґрунтування енергозберігаючих заходів і підвищення енергоефективності ЗТК пропонується враховувати лише статистичні характеристики та закономірності процесів водоподачі й енергоспоживання [1, 2, 3, 4]. Математичне моделювання, що здійснюється для систем водоподачі та водовідведення [5], не враховує технічні характеристики та особливості режимів роботи ЗТК.

Постановка завдання. При обґрунтуванні енергоефективних технологій управління ЗТК виникає необхідність математичного моде-

© В.П. Попов, М.М. Таргоній, 2014

лювання динамічних процесів водоподачі та енергоспоживання. Насамперед, така задача виникає при техніко-економічному обґрунтуванні системи автоматизованого керування водоподачею із застосуванням перетворювачів частоти, що потребує значних затрат на обладнання та реконструкцію НС.

Вирішення завдання. До типових ланок моделі об'єкта управління машинної водоподачі на ЗТК належать: асинхронний електродвигун, відцентровий насос, засувка на напірному трубопроводі, ділянка трубопроводу зрошувальної мережі, ДМ та ін.

За теорією автоматичного управління асинхронний електродвигун описується двома послідовно з'єднаними аперіодичними ланками першого порядку з електричною постійною часу T_e , механічною постійною часу T_m та коефіцієнтом передачі K_d [6].

Електрична постійна часу T_e визначається за технічними характеристиками асинхронного електродвигуна, а механічна постійна часу T_m – за моментом інерції приводного електродвигуна та моментом інерції насоса. Як правило, механічну постійну часу отримують експериментально за розгінною характеристикою НА.

Напірну характеристику відцентрового насоса представляють у вигляді відрізка параболи [7]:

$$H = a_1 Q^2 + b_1 Q + c_1, \quad (1)$$

де H – напір насоса, м; Q – витрата води, створювана НА, м³/год.; a_1, b_1, c_1 – параметри формули, що розраховують за методом найменших квадратів.

При моделюванні, як правило, використовують паспортну характеристику відцентрового насоса для визначеного діаметра робочого колеса.

Гідродинамічні перехідні процеси, що виникають при пуску НА на закриту засувку на напірному трубопроводі насоса, описують послідовно з'єднаними двома аперіодичними ланками першого порядку. Передавальна функція даної технологічної ланки має вигляд:

$$W_H(p) = \frac{K_H}{(T_{1H}p+1)(T_{2H}p+1)}, \quad (2)$$

де K_H – коефіцієнт передачі насоса, що визначається за відношенням його напору при $Q = 0$ до швидкості обертання вала електродвигуна; T_{1H}, T_{2H} – постійні часу, що визначаються експериментально за тривалістю перехідного процесу ($T_H \approx 2,5$ с); p – оператор Лапласа.

Динаміка відкриття напірної засувки насоса описується передавальною функцією інтегратора:

$$W_3(p) = \frac{K_3}{p}, \quad (3)$$

де K_3 – коефіцієнт передачі виконавчого електроприводного механізму засувки, що визначається за швидкістю відкриття засувки.

Витратна характеристика засувки на напірному трубопроводі задається однією із формул:

$$Q_3 = \mu(H) \cdot \frac{\Delta a}{a} \sqrt{\Delta H}, \quad (4)$$

$$Q_3 = \mu\left(\frac{\Delta a}{a}\right) \cdot \frac{\Delta a}{a} \sqrt{\Delta H}, \quad (5)$$

де Q_3 – витрата води через засувку, м³/год.; $\frac{\Delta a}{a}$ – відносне відкриття засувки; $\mu(H)$ і $\mu\left(\frac{\Delta a}{a}\right)$ – коефіцієнти витрат, що визначаються експериментально, ΔH – втрати напору на засувці, м.

Для зміни режимів роботи відцентрових насосів застосовують як напірні засувки, так і дискові затвори, а для зупинки зворотного руху води – зворотні клапани.

Місцеві втрати напору в засувках, поворотних затворах і зворотних клапанах визначають за формулою [1]:

$$h_M = \xi \frac{V^2}{2g}, \text{ м} \quad (6)$$

де ξ – коефіцієнт гідравлічного опору засувки, затвора або зворотного клапана; V – швидкість руху води у вхідному отворі засувки, м/с.

Втрати напору в трубопроводі по довжині залежать від швидкості води, його геометричних та гідравлічних характеристик, їх визначають за формулою [1]:

$$h_\lambda = \lambda \frac{L}{d_\Gamma} \frac{V^2}{2g}, \text{ м} \quad (7)$$

де λ – коефіцієнт шорсткості; L – довжина трубопроводу, м; d_Γ – гідравлічний діаметр, який для труби круглого перерізу визначається її діаметром d , м; V – швидкість руху води, м/с; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Для довгих трубопроводів ($L/d > 500$) втрати напору розраховують лише по довжині. Для коротких трубопроводів, щодо яких $L/d \leq 500$, втрати напору розраховують як по довжині, так і місцеві.

Для визначення втрат напору по довжині в трубопроводах з різних матеріалів рекомендується застосовувати формулу [1]:

$$h_L = L \cdot K \cdot Q^n / d^r, \text{ м} \quad (8)$$

де L – довжина трубопроводу, м; Q – витрата води, м³/с; d – внутрішній діаметр труби, м; K, n, r – параметри, які залежать від матеріалу труби.

Гідравлічні перехідні процеси, що виникають у трубопроводах зрошувальної мережі за зміни витрат води ДМ, можуть бути представлені передавальними функціями аперіодичних ланок першого порядку. Коефіцієнти передачі передавальних функцій визначають експериментально за відношенням зміни напору ΔH до зміни витрат води ΔQ . Постійну часу визначають за тривалістю перехідного процесу, що змінюється в залежності від місця розташування ДМ на ЗЗМ.

Напірні характеристики ДМ визначають за формулою [9]:

$$q_v = a_0 + a_1 H + a_2 Q^2, \quad (9)$$

де q_v – об'ємна витрата води ДМ, м³/год.; H – напір води на вході ДМ, м; a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти апроксимації напірної характеристики ДМ.

Напірні характеристики ДМ отримують експериментально із застосуванням мобільного ультразвукового витратоміра і манометра [8].

Для моделювання процесів в ЗЗМ також враховують наявні нетехнологічні втрати води, що змінюються в залежності від напорів. Характеристики втрат води отримують за результатами енергетичних обстежень ЗТК за методикою [1].

Математична модель ЗТК може бути представлена у вигляді структурної схеми. Така модель враховує основні процеси, що відбуваються в гідравлічній і електричній мережі при вмиканні або вимиканні НА, відкриванні чи закриванні напірної засувки, зміні напору води в напірній мережі при вмиканні чи зупинці ДМ. Математична модель дозволяє відтворювати перехідні процеси за зміни основних технологічних параметрів об'єкта управління, а саме: напорів води, витрат води, струму навантаження приводного електродвигуна насоса, споживаної потужності НА, питомої витрати електроенергії на перекачування води та ін.

Математична модель НА, що побудована на основі структурної схеми за допомогою стандартних блоків пакета Simulink [6, 9, 10], наведена на рис. 1.

Параметри передавальних функцій і математичних залежностей визначено за результатами аналізу гідравлічних та енергетичних характеристик при проведенні експериментальних досліджень та енергетичних обстежень на ЗТК.

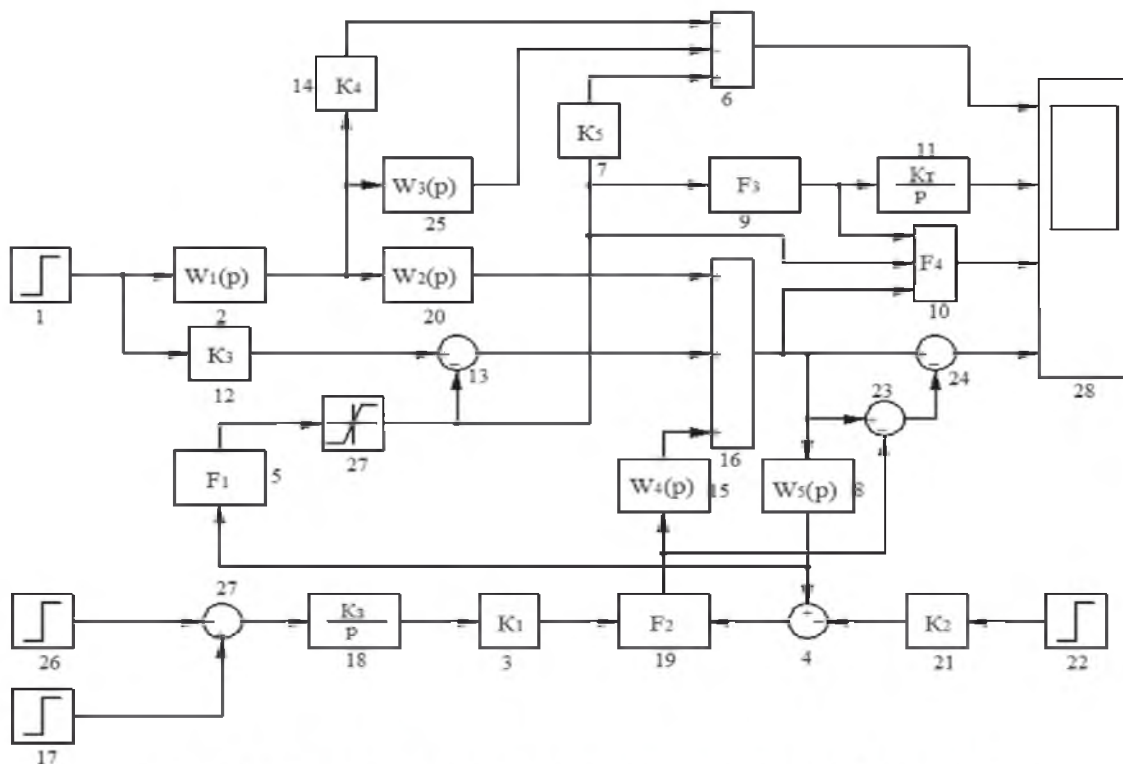


Рис.1. Структурна схема математичної моделі насосного агрегата

Закон, за яким зростають оберти приводного електродвигуна насоса при подачі напруги живлення, моделюється блоком 2. Гідралічні процеси зміни напору та витрати води моделюються з'єднаними відповідним чином блоками 20, 16, 8, 5, 12 та 13 з визначеними параметрами передавальних функцій та залежностей. При цьому блок 5 задає напірну характеристику насоса. Відкриття або закриття напірної засувки (затвора) на виході насоса моделюється блоком 17 або 26. Сигнал на виході блока 17 з'являється лише після закінчення перехідного пускового режиму НА, який триває близько 2,5 с. Лінійний закон зміни відкриття засувки моделюється блоком інтегратора 18. При цьому коефіцієнт інтегратора вибирається таким, щоб при повному відкритті напірної засувки сигнал на виході блока 18 дорівнював одиниці.

Витратна характеристика напірної засувки задається за формулою F_2 , що моделюється блоком 19, на вхід якого поступають сигнали з блоків 3 та 4. Сигнал від блока 3 залежить від величини відкриття засувки та коефіцієнта витрат μ , а сигнал, що поступає від блока суматора 4, залежить від перепаду тиску води на напірній засувці. При

цьому тиск до засувки визначається вихідним сигналом блоку 8, а тиск після засувки – вихідним сигналом блоку 21.

Графік зміни струму навантаження приводного електродвигуна насоса моделюється блоками 6, 7, 14 і 25. Закон зміни струму електродвигуна при його вмиканні моделюється передаточною функцією $W_3(P)$ блоку 25. Величина струму «холостого ходу» задається коефіцієнтом $K_{ХХ}$, а закон зміни струму навантаження приводного електродвигуна насоса визначається коефіцієнтом K_I блоку 7.

Графік зміни активної потужності НА визначається його потужнісною характеристикою за формулою F_3 на виході інтегруючого блоку 11.

Питомі витрати електроенергії на перекачування води насосним агрегатом визначаються як результат ділення споживаної потужності на витрату води, створювану НА на виході блоку 10.

Графіки перехідних процесів зміни гідравлічних параметрів НА 250QVD500-54 при пуску на закриту засувку, а також при відкриванні засувки представлені на рис. 2.

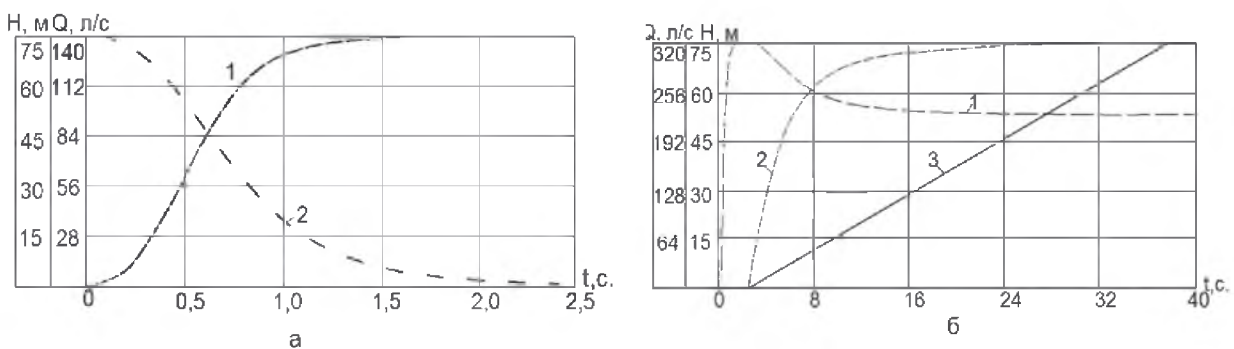


Рис. 2. Графіки перехідних процесів зміни гідравлічних параметрів НА 250QVD500-54:

а – при пуску на закриту засувку; б – при відкритті засувки;
1 – напір насоса; 2 – витрата води; 3 – відкриття засувки

Математична модель ЗЗМ з ДМ розробляється за структурною схемою для реальної закритої зрошувальної системи, що обслуговується, як правило, багатоагрегатною НС. Фрагмент структурної схеми моделі ЗЗМ з ДМ «Фрегат» від НС-7Р1 Каховського МУВГ, розробленої із застосуванням програми MATLAB/Simulink, наведено на рис. 3.

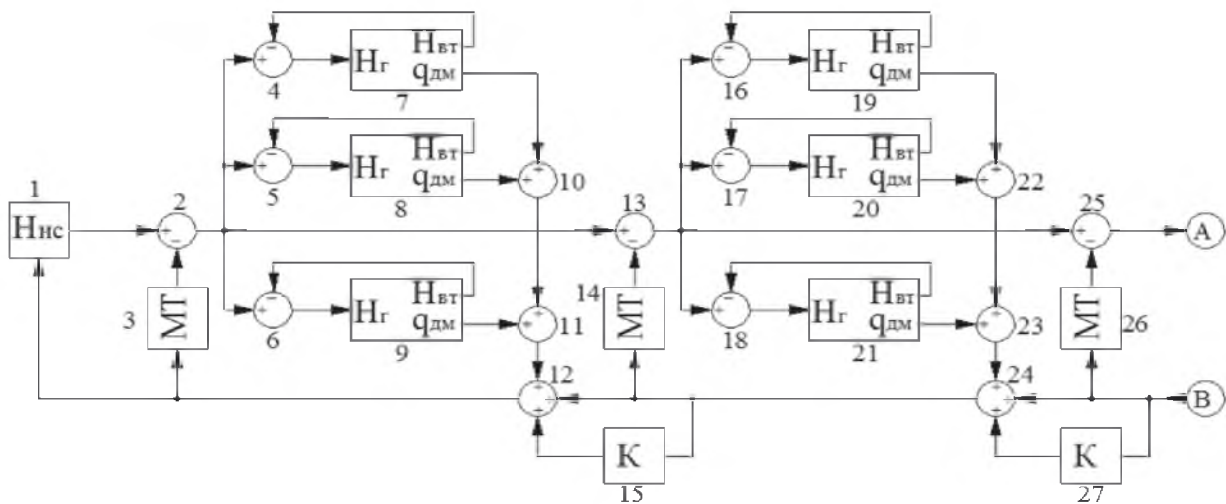


Рис. 3. Фрагмент структурної схеми моделі 33М:

1 – напір на виході НС; 2, 4-6, 10-13, 16-18, 22-25 – суматори; 7-9, 19-20 – моделі трубопроводів з ДМ; 3, 14, 26 – втрати напору в магістральному трубопроводі; 15, 27 – коефіцієнт, який враховує нетехнічні втрати води на мережі; А, В – точки під'єднання до другої частини моделі 33М

Окремі типові блоки моделі 33М, а саме: модель ділянки польового трубопроводу із ДМ, модель ДМ, модель втрат напору по довжині трубопроводу, наведені на рис. 4-6.

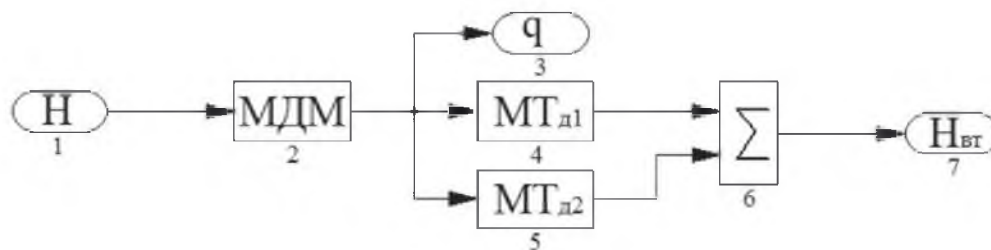


Рис. 4. Структурна схема моделі ділянки польового трубопроводу із ДМ:

1 – вхідний сигнал (напір, м); 2 – модель ДМ; 3 – q , витрата ДМ $\text{м}^3/\text{год}$; 4, 5 – моделі для визначення втрат напору на ділянках трубопроводів; 6 – суматор; 7 – вихідний сигнал (загальні втрати напору, м)

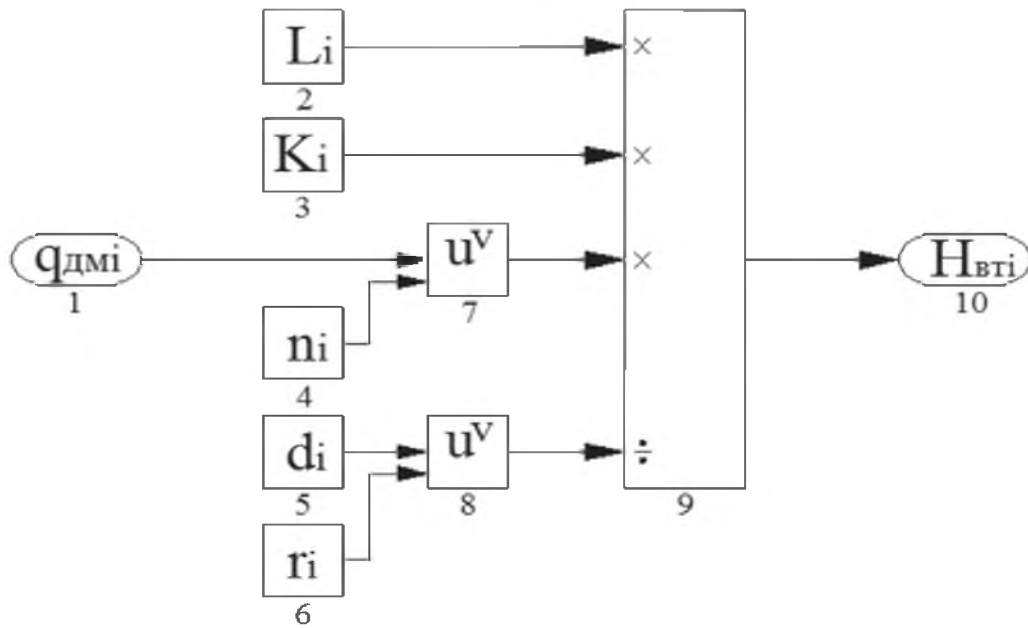


Рис. 5. Модель втрат напору на ділянці трубопроводу:

1 – вхідний сигнал (витрата, м³/год); 3, 4, 6 – коефіцієнти, які залежать від параметрів трубопроводу; 3 – довжина трубопроводу, м; 5 – діаметр труби; 7, 8 – степеневі функції; 9 – блок математичних дій (множення, ділення); 10 – вихідний сигнал (втрати напору, м)

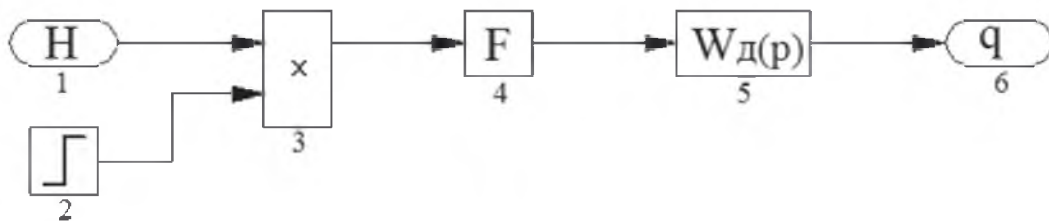


Рис. 6. Модель ДМ:

1 – вхідний сигнал (напір, м); 2 – ключ включення ДМ; 3 – добуток сигналів; 4 – напірна характеристика ДМ; 5 – передавальна функція; 6 – вихідний сигнал (витрата ДМ, м³/год)

Створена математична модель ЗЗМ відтворює динаміку напорів на гідрантах ДМ в залежності від витрат води і враховує особливості гідравлічних процесів, що виникають у вузлах розгалуженої трубопроводної мережі при зміні місцезнаходження працюючої ДМ.

При дослідженні моделі ЗТК можуть бути отримані графіки перехідних процесів зміни напорів насосів, витрат води, струмів навантаження приводних електродвигунів, споживаних ними потужностей,

питомих витрат електроенергії на перекачування води НА, залежності напорів на гідрантах ДМ від витрати води та ін.

Процеси існуючого ступінчатого управління машинною водоподачею при послідовному включанні п'яти ДМ «Фрегат» на досліджуваному ЗТК представлено на рис. 7.

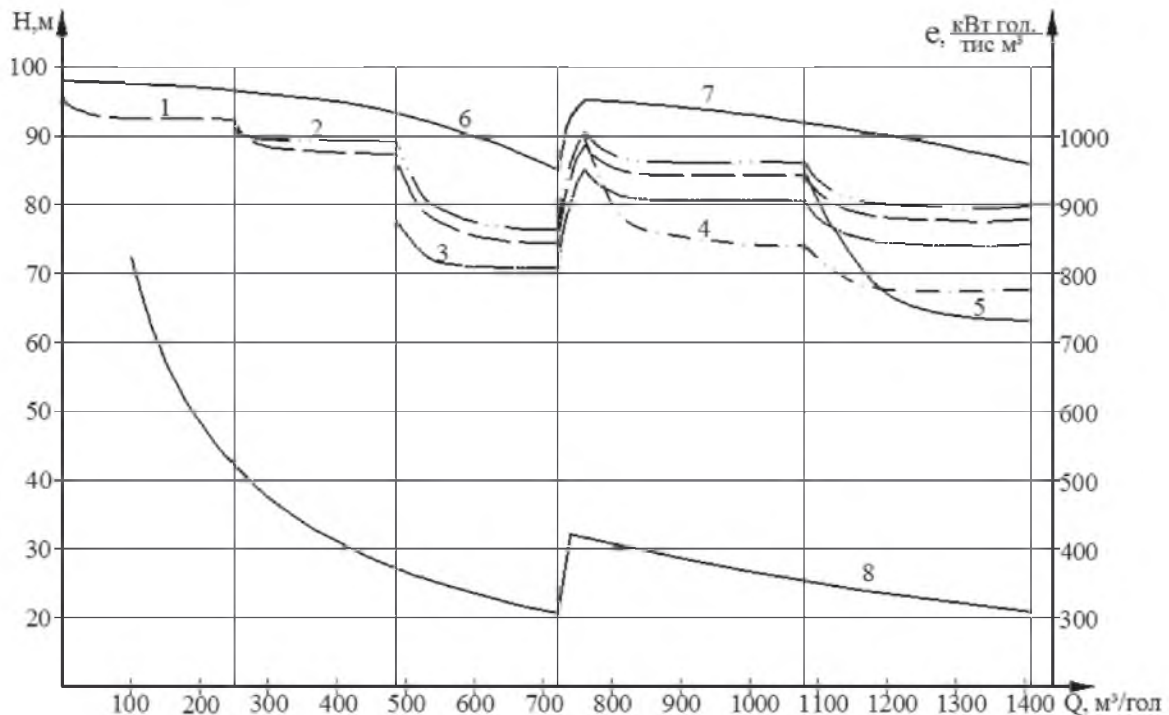


Рис. 7. Напори води на гідрантах ДМ та питомі витрати електроенергії на перекачування води НА в залежності від витрат води:

1, 2, 3, 4, 5, – напори на гідрантах при послідовному вмиканні п'яти ДМ; 6, 7 – напірні характеристики при роботі одного та двох насосів; 8 – питомі витрати електроенергії на перекачування води НА

Наведені дані свідчать, що напори на гідрантах ДМ змінюються залежно від загальних витрат води і значно перевищують мінімально можливі робочі значення. Питомі витрати електроенергії на перекачування води НА змінюються в широкому діапазоні в залежності від коефіцієнтів завантаження насосів.

Висновок. Наведена математична модель ЗТК, що складається з типових структурних ланок, параметри яких отримано за аналізом динамічних і статичних експериментальних характеристик, дозволяє проводити якісне комп'ютерне моделювання гідравлічних та електричних динамічних процесів, а також здійснювати обґрунтування енергоефективних технологій управління машинною водоподачею. Модель

рекомендується застосовувати при розрахунку втрат напорів на ділянках трубопроводів розгалуженої зрошувальної мережі, а також для аналізу гідравлічних та енергетичних характеристик НА при груповій роботі ДМ.

Бібліографія

1. *Методика* проведення енергоаудиту на об'єктах водогосподарських систем: НД 33-6.2-01-2006. – К.: Держводгосп України, 2006. – 46 с.

2. *Попов В.М.* Метод моделювання процесів водоподачі та електроспоживання на зрошувальних системах / В.М. Попов // Меліорація і водне господарство. – 2001. – Вип. 87. – С. 22–29.

3. *Шевченко А.В.* Методика изучения динамики требуемого напора в головах закрытых оросительных систем / А.В. Шевченко, В.А. Негериш // Мелиорация и водное хозяйство. – 1985. – Вып. 63. – С. 67–71.

4. *Шевченко О.В.* Статистичні закономірності групової роботи дощувальних машин «Фрегат» / О.В. Шевченко // Меліорація і водне господарство. – 1992. – Вип. 76. – С. 3–8.

5. *Фесенко А.В.* Моделирование динамических процессов в многоступенчатых системах водоотведения / А.В. Фесенко, Р.В. Федюн // Донецкий НТУ, 4 с.

6. *Трофимов А.И.* Методы теории автоматического управления, ориентированные на применение ЭВМ. Линейные стационарные и нестационарные модели / А.И. Трофимов, Н.Д. Егунов, А.Н. Дмитриева // учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат. 1997. – 656 с.

7. *Попов В.М.* Система для статистичного аналізу процесів водоподачі та електроспоживання на зрошувальних системах із застосуванням ПЕОМ / В.М. Попов, Б.В. Хом'як // Меліорація і водне господарство. – 2002. – Вип. 88. – С. 38–46.

8. *Об'єм та об'ємна витрата води, поданої дощувальними машинами і установками на зрошувальних системах.* Типова методика виконання вимірювань. МВВ 500.21–06. – К.: ІГіМ УААН, 2006. – 13 с.

9. *Васильев В.В.* Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/Simulink / В.В. Васильев, Л.А. Симаков, А.М. Рыбников // учебное пособие. – К.: НАН Украины, 2008. – 91 с.

10. *MATLAB: анализ, идентификация и моделирование систем.* Специальный справочник. СПб: Питер. – 2001. – 438 с.

Приведена математическая модель для анализа процессов водоподдачи и электропотребления на оросительном технологическом комплексе (ОТК) «насосная станция – закрытая оросительная сеть – поливная техника», разработанная с применением программы MATLAB / Simulink. Модель состоит из типовых звеньев структурной схемы – передаточных функций и математических зависимостей, параметры которых определены по результатам анализа гидравлических процессов и энергетических характеристик при проведении экспериментальных исследований и энергоаудита на ОТК.

A mathematical model for the analysis of water supply and power consumption in the irrigation technological complex (ITC) «pumping station - closed irrigation network - irrigation technique» developed by using MATLAB / Simulink program is given. The model consists of standard parts of a block diagram - transfer functions and mathematical relationships the parameters of which were determined from the analysis of hydraulic processes and power characteristics during the experimental studies and energy audit in ITC.