

ЛІНЕАРИЗОВАНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВОСТАДІЙНОГО ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ НАФТИ

М. І. Горбійчук, Д. Д. Поварчук

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504521,
e-mail: gorb@nung.edu.ua, povarchukdima007@gmail.com

На основі отриманої авторами математичної моделі процесу сепарації побудована лінеаризована модель, яка є справедливою для малих відхилень вхідних величин від деяких базових значень. Лінеаризовані математичні моделі дали змогу визначити матричні передавальні функції об'єкта керування та побудувати структурні схеми як першої та другої ступенів сепарації, так і об'єкта в цілому. У результаті аналізу матричних передавальних функцій і структурних схем виявлено, що існують перехресні зв'язки, що ускладнюють процес керування таким об'єктом. Отримані результати послужать основою для вивчення властивостей процесу сепарації як об'єкта керування, а саме: спостережливості і керованості, а також для синтезу автоматичної системи керування процесом сепарації нафти.

Ключові слова: нафта, сепарація, математична модель, лінеаризація, матричні передавальні функції, структурні схеми.

На основе полученной авторами математической модели процесса сепарации построена линеаризованная модель, которая является справедливой для малых отклонений входных величин от некоторых базовых значений. Линеаризованные математические модели позволили определить матричные передаточные функции объекта управления и построить структурные схемы как первой и второй степеней сепарации, так и объекта в целом. В результате анализа матричных передаточных функций и структурных схем установлено, что существуют перекрестные связи, затрудняющие процесс управления таким объектом. Полученные результаты послужат основой для изучения свойств процесса сепарации как объекта управления таких как наблюдаемость и управляемость, а также для синтеза автоматической системы управления процессом сепарации нефти.

Ключевые слова: нефть, сепарация, математическая модель, линеаризация, матричные передаточные функции, структурные схемы.

A linearized model is developed on the basis of the obtained mathematical model of the separation process. It is valid for small deviations of the input quantities from certain base values. Linearized mathematical models made it possible to determine the matrix process transfer functions and to construct structural diagrams of both the first and second separation degrees and the object as a whole. As a result of the analysis of matrix transfer functions and structural schemes, it has been established that there are cross-links that make it difficult to control such an object. The obtained results will serve as a basis for studying the properties of the separation process such as observability and controllability, as well as for the synthesis of an automatic control system for oil separation process.

Keywords: oil, separation, mathematical model, linearization, matrix transfer functions, structural schemes.

Вступ

Герметизовані системи збору і підготовки нафти з подальшим їх транспортуванням до споживачів включають у себе сепараційні установки (системи), які мають у своєму складі кілька ступенів сепарації.

Сепараційні системи здійснюють операції щодо збору, підготовки і зберігання нафти і виконують такі функції [1]: транспортування продукції свердловини під дією пластового тиску або за рахунок енергії насосів до пункту підготовки нафти; відділення газу від нафти і подача його споживачам; відділення вільної води від продукції свердловин (у випадку добути заводненої нафти).

Ефективність процесу сепарації в значній степені визначається методами і алгоритмами систем автоматичного керування. З огляду на те, що процес сепарації протікає під дією численних завод та притаманних йому складних внутрішніх зв'язків, розробка ефективних систем автоматичного керування повинна ґрунту-

ватись на адекватних математичних моделях, які кількісно і якісно характеризують процес сепарації загалом.

Аналіз публікацій та висвітлення невирішених раніше проблем

Однією із перших математичних моделей, яка описує процес сепарації в термінах «вхід-вихід» і яка придатна для синтезу автоматичних систем керування, була модель, що запропонована у роботі [8].

У сепараційних установках процес сепарації здійснюється у кілька стадій, найчастіше у дві стадії [11]. Режим роботи першої ступені суттєво впливає на ефективність роботи наступної ступені. Тому актуальною науковою задачею є створення математичної моделі двостадійної сепараційної установки як об'єкта автоматичного керування.

Переважає більшість робіт, в яких висвітлюються питання математичного моделювання процесів сепарації, орієнтовані на вибір геоме-

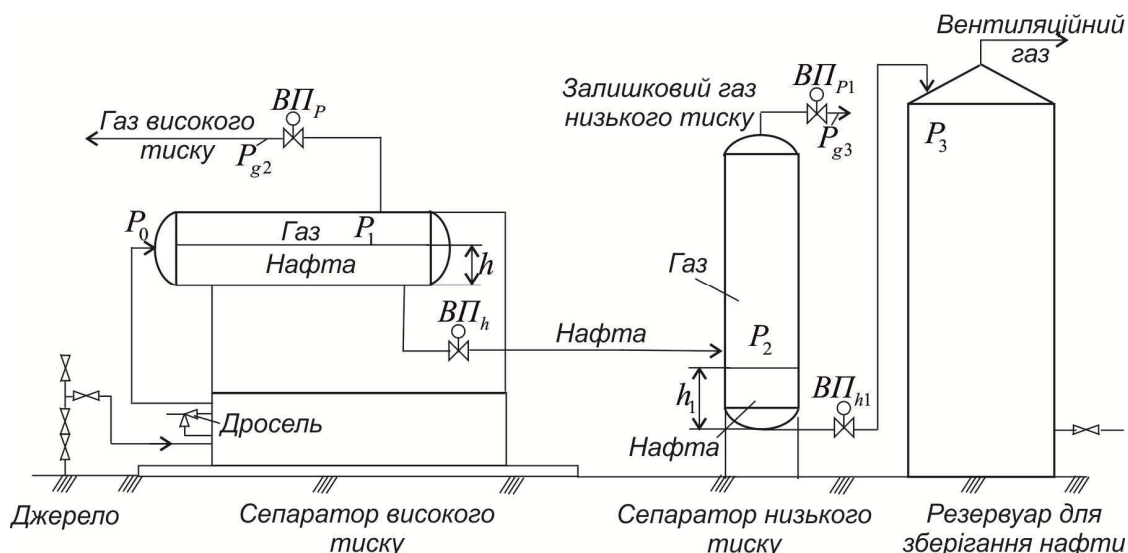


Рисунок 1 – Двостадійна сепараційна система

тричних розмірів сепараторів [2,3], їхньої продуктивності [4] і ефективності роботи сепараторів [4, 5].

Так у роботі [4] проаналізовані фактори, які впливають на ефективність роботи сепаратора. Тут наведені такі важливі показники як газовий фактор і коефіцієнт розчинності газу. Для розрахунку пропускної здатності сепараторів використовують теорію руху частинок газу в гравітаційному полі [4, 6]. У роботі [7] зроблений детальний аналіз впливу технологічних факторів на ефективність процесу сепарації.

Серед пізніших робіт слід звернути увагу на роботу [9], де на основі моделі низькотемпературної сепарації запропонований підхід до побудови регулятора нелінійним об'єктом із затримкою. У роботі [10] запропоновані математичні моделі сепаратора, кожна із яких описує зміни тиску і рівня в сепараторі в залежності від технологічних параметрів. При цьому враховано взаємовплив рівня рідини і тиску в сепараторі.

Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є обґрунтування доцільності розроблення математичної моделі установки двостадійної сепарації як такої і в подальшому синтез ефективних систем автоматичного керування процесом сепарації та створення математичних моделей у термінах «вхід-вихід».

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

1. Проаналізувати математичні моделі існуючих сепараційних установок.
2. Здійснити лінеаризацію раніше отриманої математичної моделі двостадійної сепарації.
3. Сформулювати висновки на основі проведених досліджень.

Виклад основного матеріалу

Розглядається двостадійна сепараційна система (рис. 1), яка має дві ступені. На першій ступені відбувається часткове розгазування

пластової нафти в горизонтальному сепараторі. Потік частково відсепарованої нафти поступає на другу ступень сепарації у вертикальний сепаратор. Нафта після другої ступені сепарації поступає у вертикальний резервуар, який знаходиться під атмосферним тиском.

У роботі [12], виходячи із рівняння матеріального балансу, отримана математична модель процесу сепарації нафти.

Для першої ступені сепарації

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{1}{(V_0 - V_p)} \left(\left(\frac{\varepsilon_g}{\theta_g} + \frac{P_1}{\rho_n} \varepsilon_n \right) \xi_f \sqrt{\rho_f (P_0 - P_1)} - \frac{\alpha_g(U_1)}{\theta_g} \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_{g2}^2)}{\bar{z}T_1}} \right) \quad (1)$$

$$- \frac{P_1}{\rho_n} \alpha_n(U_2) \sqrt{\rho_n (P_1 + \rho_n g h - P_2)} \Big),$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho_n L_s L_h} \left(\varepsilon_n \xi_f \sqrt{\rho_f (P_0 - P_1)} - \alpha_n(U_2) \sqrt{\rho_n (P_1 + \rho_n g h - P_2)} \right), \quad (2)$$

$$V_p = L_s r_s^2 \times$$

$$\times \left(\pi - \arccos \left(\frac{h}{r_s} - 1 \right) + \left(\frac{h}{r_s} - 1 \right) \sqrt{1 - \left(\frac{h}{r_s} - 1 \right)^2} \right), \quad (3)$$

$$\varepsilon_g = \Gamma_0 (1 - r_g), \quad (4)$$

$$\varepsilon_n = (1 - \Gamma_0) (1 - r_n), \quad (5)$$

$$L_h = 2r_s \sqrt{1 - \left(\frac{h}{r_s} - 1 \right)^2}, \quad (6)$$

де P_0 - тиски газу на вході в сепаратор;
 V_0 - повний об'єм сепаратора першої ступені;

V_p - заповнений нафтою об'єм, що обчислюється за формулою (3);

$\varepsilon_g, \varepsilon_n$ - відповідно коефіцієнти сепарації газу і нафти, який визначаються формулами (4) і (5);

$$\theta_g = \frac{1}{zR_g T_1} ;$$

z - коефіцієнт стисливості газу;

R_g - газова стала;

T_1 - температура газу в ємності;

ρ_n, ρ_f - відповідно густина нафти і нафтогазової суміші, що поступає в першу ступінь сепарації;

ξ_f - коефіцієнт, що характеризує місцевий опір руху газу через виконавчий пристрій $ВП_p$ (рис. 1);

$\alpha_g(U_1), \alpha_n(U_2)$ - величини, що характеризують пропускні здатності виконавчих пристроїв $ВП_p$ і $ВП_h$ (рис. 1);

U_1, U_2 - командні сигнали, що поступають на $ВП_p$ і $ВП_h$;

P_1, P_{g2} - тиски до і після затвору регулюючого органу $ВП_p$;

h - рівень нафти у сепараторі;

L_s, r_s - довжина і діаметр сепаратора;

Γ_0 - газовий фактор;

r_n, r_g - величини, що характеризують ступінь розгазування нафти в сепараторі.

Рівняння (1) – (6) описують динаміку процесу сепарації у просторі станів з координатами P_1 і h .

Густину нафтогазової суміші обчислюють за такою формулою:

$$\rho_f = \frac{P_0 \gamma_{nc} \rho_n}{x P_0 \gamma_{nc} + z_0 T_0 (1-x) \rho_n} , \quad (7)$$

де $\gamma_{nc} = \frac{\rho_{nc} T_{nc}}{P_{nc}}$;

z_0, T_0 - коефіцієнт стисливості і температура газу в нафтогазовій суміші;

x - частка газу в нафтогазовій суміші;

$\rho_{nc}, T_{nc}, P_{nc}$ - густина, температура і тиск газу за стандартних умов.

Коефіцієнт ξ_f , що характеризує втрати тиску при проходженні газу через регулюючий орган, визначають за такою формулою:

$$\xi_f = F_f \sqrt{\frac{2D_f}{\lambda l_f}} , \quad (8)$$

де λ - коефіцієнт опору тертю;

D_f - діаметр вхідного трубопроводу;

l_f - сумарна довжина ділянки, яка включає еквівалентні довжини місцевих опорів;

F_f - площа поперечного перерізу трубопроводу.

Коефіцієнти стисливості газу z і z_0 обчислюють за модифікованим рівнянням стану Бенедикта-Вебба-Рабіна (BWR-рівняння) [8].

Для другої ступені сепарації

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{\rho_n S_2} \left(\alpha_n(U_2) \sqrt{\rho_n (P_1 + \rho_n g h - P_2)} - \right. \quad (9)$$

$$\left. - \alpha_{n1}(U_{s2}) \sqrt{\rho_n (P_2 + \rho_n g h_1 - P_3)} \right),$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{1}{V_{01} - S_2 h_1} \times$$

$$\times \left(\left(\frac{P_2}{\rho_n} + R_g T_2 \varepsilon_{g1} \right) \alpha_n(U_2) \sqrt{\rho_n (P_1 + \rho_n g h - P_2)} - \right. \\ \left. - S_2 P_2 \alpha_{n1}(U_{s2}) \sqrt{\rho_n (P_2 + \rho_n g h_1 - P_3)} - \right. \\ \left. - R_g T_2 \alpha_{g1}(U_{s1}) \sqrt{\frac{(P_2^2 - P_{g3}^2)}{T_2}} \right), \quad (10)$$

де h_1 - рівень нафти в сепараторі;

S_2 - площа поперечного січення сепаратора;

V_{01} - повний об'єм сепаратора;

P_2 - тиск газу в сепараторі;

$\alpha_{n1}(U_{s2}), \alpha_{n1}(U_{s2})$ - величини, що характеризують пропускну здатність виконавчих пристроїв $ВП_{h1}$ і $ВП_{p1}$ (рис. 1);

P_2, T_2 - тиск і температура в сепараторі;

ε_{g1} - коефіцієнт сепарації;

P_3 - тиск в ємності накопичення нафти (рис. 1);

P_{g3} - тиск газу після регулюючого органу виконавчого пристрою $ВП_{p1}$ другої ступені сепарації, який поступає в лінію залишкового газу (рис. 1);

U_{s1}, U_{s2} - командні сигнали, що поступають на $ВП_{h1}$ і $ВП_{p1}$.

Аналіз математичних моделей (1), (2) першої ступені сепарації і (9), (10) другої ступені дає змогу зробити такий висновок: вхідні дії на об'єкт – командні сигнали U_1 і U_2 ; вихідні величини – тиск газу в сепараторі P_1 і рівень нафти у сепараторі h ; збурення, що діють на об'єкт – тиск P_0 , під яким нафтогазова суміш подається в сепаратор; тиск P_{g2} за РО, який встановлений на лінії відбору газу із першої ступені сепаратора; температура T_0 нафтогазової суміші і температура T_1 у сепараторі; частка газу x , що міститься у нафтогазовій суміші. Вхідними величинами процесу сепарації другої ступені, як об'єкта керування, будуть командні сигнали U_{s1} і U_{s2} ; вихідні величини – рівень

нафти h_1 і тиск у сепараторі другої ступені P_2 . Інші величини такі як тиски P_1 , P_3 і P_{g3} , рівень нафти h в сепараторі першої ступені, командний сигнал U_2 та температура газу T_2 другої ступені сепарації слід розглядати як збурення.

Для забезпечення ефективного протікання процесу сепарації сепараційні системи оснащені засобами автоматизації, завданням яких є стабілізація рівня рідини і тиску газу в сепараторах першої і другої ступені. Оскільки регулятори тиску і рівня працюють за принципом зворотного від'ємного зв'язку, то це забезпечує невелике відхилення регульованих величин від їх заданих значень, що і є підставою для лінеаризації математичних моделей процесу сепарації.

Будемо позначати верхнім індексом «0» усталені значення величин, які входять в математичні моделі процесу сепарації, а їх відхилення від усталених значень позначимо грецькою буквою « Δ » перед відповідною величиною.

Основою лінеаризації є формула Тейлора, за допомогою якої нелінійна функція розкладається в нескінченний степеневий ряд за приростами аргументів з подальшим врахуванням лінійних членів розкладу.

Лінеаризацію будемо здійснювати при таких допущеннях. Будемо вважати сталими величини, які входять до математичних моделей (1) – (6), (9) і (10), - λ - коефіцієнт опру тертю; l_f - сумарну дожину ділянок; D_f - діаметр вхідного трубопроводу першої ступені сепарації; x - частка газу в нафтогазовій суміші; r_g , r_n , r_{g1} і r_{n1} - показники ефективності першої і другої ступені сепарації; T_0 і T_1 - температуру газу у першій і другій ступені сепараційної системи; тиск газу P_{g2} , який приймаємо рівним тиску газу в лінії високого тиску (рис. 1); ρ_n - густину нафти. Коефіцієнти стисливості газу z_0 і z будемо обчислювати відповідно при значеннях $P_1^{(0)}$, T_0 , $P_2^{(0)}$ і T_1 . При прийнятих допущеннях постійними будуть також величини ξ_f , θ_g і густина газу ρ_f , яка обчислюється за формулою (7).

Лінеаризуємо математичну модель (1) і (2) першої ступені сепарації. Для цього запишемо її у векторній формі

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = \bar{f}(\bar{X}, \bar{U}, V), \quad (11)$$

де $\bar{X} = \begin{bmatrix} P_1 \\ h \end{bmatrix}$ - вектор станів об'єкта (сепаратора);

$\bar{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$ - вектор командних сигналів;

$V = P_2$.

Математичну модель сепаратора, яка подана у векторній формі (11), розкладемо у ряд Тейлора, обмежившись лише лінійними членами розкладу

$$\frac{d(\Delta\bar{X})}{dt} = J_{fX}(\bar{X}^{(0)}, \bar{U}^{(0)}, V^{(0)})\Delta\bar{X} + J_{fU}(\bar{X}^{(0)}, \bar{U}^{(0)}, V^{(0)})\Delta\bar{U} + J_{fV}(\bar{X}^{(0)}, \bar{U}^{(0)}, V^{(0)})\Delta V,$$

де $J_{fX}(\bar{X}^{(0)}, \bar{U}^{(0)}, V^{(0)})$, $J_{fU}(\bar{X}^{(0)}, \bar{U}^{(0)}, V^{(0)})$, $J_{fV}(\bar{X}^{(0)}, \bar{U}^{(0)}, V^{(0)})$ - матриця Якобі.

Таким чином, лінеаризовану математичну модель першої ступені сепарації запишемо у такому вигляді:

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = A\bar{x}(t) + B\bar{u}(t) + \Omega v(t), \quad (13)$$

$$\bar{y}(t) = \bar{x}(t). \quad (14)$$

Елементи матриць A , B і Ω , в яких відповідні фізичні величини необхідно замінити на їх усталені значення.

Рівняння (14) називають рівнянням замикання і воно визначає функціональний зв'язок між виходами об'єкта $\bar{y}(t)$ і його змінними стану $\bar{x}(t)$.

Оскільки лінеаризована математична модель першої ступені сепаратора (13) записана у відхиленнях, то початкові умови будуть нульовими.

Рівняння (13) і (14) перетворимо за Лапласом з врахуванням нульових початкових умов

$$p\bar{x}(p) = A\bar{x}(p) + B\bar{u}(p) + \Omega v(p), \quad (15)$$

$$\bar{y}(p) = \bar{x}(p). \quad (16)$$

Із рівняння (15) знайдемо, що

$$\bar{x}(p) = (Ip - A)^{-1} (B\bar{u}(p) + \Omega v(p)),$$

де I - одинична матриця.

Підставляючи значення $\bar{x}(p)$ в (16), отримуємо

$$\bar{y}(p) = (Ip - A)^{-1} B\bar{u}(p) + (Ip - A)^{-1} \Omega v(p).$$

Нехай $\bar{y}_1(p) = (Ip - A)^{-1} B\bar{u}(p)$ і $\bar{y}_2(p) = (Ip - A)^{-1} \Omega v(p)$. За визначенням $W_1(p) = (Ip - A)^{-1} B$ і $W_2(p) = (Ip - A)^{-1} \Omega$ - матричні передавальні функції за входами $\bar{u}(p)$ і $v(p)$.

Таким чином, вектор-вихідна величина є суперпозицією двох вектор-величин

$$\bar{y}(p) = \bar{y}_1(p) + \bar{y}_2(p). \quad (17)$$

Обчислимо матричні передавальні функції

$$W_1(p) = \frac{1}{\Delta(p)} \begin{bmatrix} p - a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & p - a_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta(p)} \begin{bmatrix} b_{11}(p - a_{22}) & b_{12}(p - a_{22}) + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} & a_{21}b_{12} + b_{22}(p - a_{11}) \end{bmatrix}.$$

Отриманий результат дає змогу знайти передавальні функції сепаратора по відношенню до командних сигналів u_1 і u_2

$$w_{11}(p) = \frac{b_{11}p - a_{22}b_{11}}{\Delta(p)},$$

$$w_{12}(p) = \frac{b_{12}p + a_{12}b_{22} - a_{22}b_{12}}{\Delta(p)},$$

$$w_{21}(p) = \frac{a_{21}b_{11}}{\Delta(p)},$$

$$w_{22}(p) = \frac{b_{22}p + a_{21}b_{12} - a_{11}b_{22}}{\Delta(p)}.$$

Тепер знайдемо матричну передавальну функцію $W_2(p)$, яка зумовлена дією на об'єкт збурення $v(t)$. Маємо

$$W_2(p) = \frac{1}{\Delta(p)} \begin{bmatrix} p - a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & p - a_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{1}{\Delta(p)} \begin{bmatrix} \omega_1(p - a_{22}) + a_{12}\omega_2 \\ a_{21}\omega_1 + \omega_2(p - a_{11}) \end{bmatrix}.$$

Елементи матриці $W_2(p)$ це передавальні функції об'єкта відносно збурення $v(t)$

$$w_1(p) = \frac{\omega_1 p + a_{12}\omega_2 - a_{22}\omega_1}{\Delta(p)},$$

$$w_2(p) = \frac{\omega_2 p + a_{21}\omega_1 - a_{11}\omega_2}{\Delta(p)}.$$

Тепер лінеаризуємо математичну модель другої ступені сепарації, яка подана диференціальними рівняннями (9) і (10). Лінеаризацію будемо здійснювати при таких допущеннях. Температуру T_2 у сепараторі другої ступені, густину нафти ρ_n і тиски P_3 та P_{g3} будемо вважати сталими величинами.

Математичну модель сепаратора другої ступені подамо у вигляді диференціального векторного рівняння

$$\frac{d\bar{X}_s}{dt} = \bar{\varphi}(\bar{X}_s, \bar{U}_s, \bar{V}_s), \quad (18)$$

$$\bar{Y}_s = \bar{X}_s, \quad (19)$$

$\bar{X}_s = \begin{bmatrix} P_2 \\ h_1 \end{bmatrix}$ - вектор змінних стану об'єкта (сепаратора другої ступені);

$\bar{U}_s = \begin{bmatrix} U_{s1} \\ U_{s2} \end{bmatrix}$ - вектор командних сигналів;

$\bar{V}_s = \begin{bmatrix} U_2 \\ P_1 \\ h \end{bmatrix}$ - вектор збурень.

За аналогією з рівнянням (12) запишемо лінеаризовану математичну модель сепаратора другої ступені

$$\frac{d(\Delta\bar{X}_s)}{dt} = J_{fX}^{(s)}(\bar{X}_s^{(0)}, \bar{U}_s^{(0)}, \bar{V}_s^{(0)})\Delta\bar{X}_s +$$

$$+ J_{fU}^{(s)}(\bar{X}_s^{(0)}, \bar{U}_s^{(0)}, \bar{V}_s^{(0)})\Delta\bar{U}_s + \quad (20)$$

$$+ J_{fV}^{(s)}(\bar{X}_s^{(0)}, \bar{U}_s^{(0)}, \bar{V}_s^{(0)})\Delta\bar{V}_s,$$

$$\Delta\bar{Y}_s = \Delta\bar{X}_s. \quad (21)$$

Матриці Якобі, які входять у лінеаризовану модель (20), обчислюються аналогічно як і матриці для першої ступені сепарації. Елементи матриць необхідно обчислити при ustalених значеннях відповідних величин, які входять у формули, що визначають елементи матриць $J_{fX}^{(s)}(\bar{X}_s^{(0)}, \bar{U}_s^{(0)}, \bar{V}_s^{(0)})$, $J_{fU}^{(s)}(\bar{X}_s^{(0)}, \bar{U}_s^{(0)}, \bar{V}_s^{(0)})$ і $J_{fV}^{(s)}(\bar{X}_s^{(0)}, \bar{U}_s^{(0)}, \bar{V}_s^{(0)})$. Якщо ввести позначення $A_s = J_{fX}^{(s)}(\bar{X}_s^{(0)}, \bar{U}_s^{(0)}, \bar{V}_s^{(0)})$, $B_s = J_{fU}^{(s)}(\bar{X}_s^{(0)}, \bar{U}_s^{(0)}, \bar{V}_s^{(0)})$ і $\Omega_s = J_{fV}^{(s)}(\bar{X}_s^{(0)}, \bar{U}_s^{(0)}, \bar{V}_s^{(0)})$, то отримаємо лінеаризовану математичну модель другої ступені сепаратора з нульовими початковими умовами

$$\frac{d\bar{x}_s(t)}{dt} = A_s \bar{x}_s(t) + B_s \bar{u}_s(t) + \Omega_s \bar{v}_s(t), \quad (22)$$

$$\bar{y}_s(t) = \bar{x}_s(t), \quad (23)$$

де $\bar{x}_s(t) = \begin{bmatrix} x_{s1}(t) \\ x_{s2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2(t) \\ \Delta h_1(t) \end{bmatrix},$

$$\bar{u}_s(t) = \begin{bmatrix} u_{s1}(t) \\ u_{s2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_{s1}(t) \\ \Delta U_{s2}(t) \end{bmatrix},$$

$$\bar{v}_s(t) = \begin{bmatrix} v_{s1}(t) \\ v_{s2}(t) \\ v_{s3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_2(t) \\ \Delta P_1(t) \\ \Delta h(t) \end{bmatrix}.$$

Перетворивши рівняння (22) за Лапласом при нульових початкових умовах, отримаємо математичну модель сепаратора другої ступені, яка виражена через матричні передавальні функції відносно величин $\bar{u}_s(p)$ і $\bar{v}_s(p)$

$$\bar{y}_s(p) = W_{s1}(p)\bar{u}_s(p) + W_{s2}(p)\bar{v}_s(p), \quad (24)$$

де $W_{s1}(p) = (Ip - A_s)^{-1} B_s,$

$$W_{s2}(p) = (Ip - A_s)^{-1} \Omega_s.$$

Таким чином, вихід другої ступені сепаратора є сумою двох величин. Одна з них зумовлена дією командних сигналів, а друга – дією збурень. У відповідності з (24)

$$\bar{y}_s(p) = \bar{y}_{s1}(p) + \bar{y}_{s2}(p). \quad (25)$$

Очевидно, що

$$\bar{y}_{s1}(p) = W_{s1}(p)\bar{u}_s(p), \quad (26)$$

$$\bar{y}_{s2}(p) = W_{s2}(p)\bar{v}_s(p). \quad (27)$$

Знайдемо матричну передавальну функцію $W_{s1}(p)$ з врахуванням значень матриць A_s і B_s . Маємо

$$W_{s1}(p) = \frac{1}{\Delta_s(p)} \begin{bmatrix} p - a_{22}^{(s)} & a_{12}^{(s)} \\ a_{21}^{(s)} & p - a_{11}^{(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11}^{(s)} & b_{12}^{(s)} \\ 0 & b_{22}^{(s)} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta_s(p)} \begin{bmatrix} b_{11}^{(s)}(p - a_{22}^{(s)}) & b_{12}^{(s)}(p - a_{22}^{(s)}) + a_{12}^{(s)}b_{22}^{(s)} \\ a_{21}^{(s)}b_{11}^{(s)} & a_{21}^{(s)}b_{12}^{(s)} + b_{22}^{(s)}(p - a_{11}^{(s)}) \end{bmatrix} \quad (28)$$

де $\Delta_s(p) = p^2 - (a_{11}^{(s)} + a_{22}^{(s)})p + a_{11}^{(s)}a_{22}^{(s)} - a_{12}^{(s)}a_{21}^{(s)}$.

Динамічні властивості сепаратора другої ступені по відношенню до командних сигналів будуть визначатись такими передавальними функціями:

$$w_{11}^{(s1)}(p) = \frac{b_{11}^{(s)}(p - a_{22}^{(s)})}{\Delta_s(p)},$$

$$w_{12}^{(s1)}(p) = \frac{b_{12}^{(s)}p + a_{12}b_{22}^{(s)} - a_{22}^{(s)}b_{12}^{(s)}}{\Delta_s(p)},$$

$$w_{21}^{(s1)}(p) = \frac{a_{21}^{(s)}b_{11}^{(s)}}{\Delta_s(p)},$$

$$w_{22}^{(s1)}(p) = \frac{b_{22}^{(s)}p + a_{21}^{(s)}b_{12}^{(s)} - a_{11}^{(s)}b_{22}^{(s)}}{\Delta_s(p)}.$$

Для на процес сепарації збурень буде характеризуватись матричною передавальною функцією

$$W_{s2}(p) = \frac{1}{\Delta_s(p)} \begin{bmatrix} p - a_{22}^{(s)} & a_{12}^{(s)} \\ a_{21}^{(s)} & p - a_{11}^{(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta_s(p)} \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \end{bmatrix}, \quad (29)$$

де $A_1 = \omega_1(p - a_{22}^{(s)}) + a_{12}^{(s)}\omega_{21}$;

$A_2 = \omega_2(p - a_{22}^{(s)}) + a_{12}^{(s)}\omega_{22}$;

$A_3 = \omega_3(p - a_{22}^{(s)}) + a_{12}^{(s)}\omega_{23}$;

$B_1 = a_{21}^{(s)}\omega_1 + \omega_{21}(p - a_{11}^{(s)})$;

$B_2 = a_{21}^{(s)}\omega_2 + \omega_{22}(p - a_{11}^{(s)})$;

$B_3 = a_{21}^{(s)}\omega_3 + \omega_{23}(p - a_{11}^{(s)})$.

Отримана матрична передавальна функція дає змогу визначити функції передачі збурень за окремими каналами:

$$w_{11}^{(s2)}(p) = \frac{\omega_1 p + a_{12}^{(s)}\omega_{21} - a_{22}^{(s)}\omega_1}{\Delta_s(p)},$$

$$w_{12}^{(s2)}(p) = \frac{\omega_2 p + a_{12}^{(s)}\omega_{22} - a_{22}^{(s)}\omega_2}{\Delta_s(p)},$$

$$w_{13}^{(s2)}(p) = \frac{\omega_3 p + a_{12}^{(s)}\omega_{23} - a_{22}^{(s)}\omega_3}{\Delta_s(p)},$$

$$w_{21}^{(s2)}(p) = \frac{p\omega_{21} + a_{21}^{(s)}\omega_{11} - a_{11}^{(s)}\omega_{21}}{\Delta_s(p)},$$

$$w_{22}^{(s2)}(p) = \frac{p\omega_{22} + a_{21}^{(s)}\omega_{12} - a_{11}^{(s)}\omega_{22}}{\Delta_s(p)},$$

$$w_{23}^{(s2)}(p) = \frac{p\omega_{23} + a_{21}^{(s)}\omega_{13} - a_{11}^{(s)}\omega_{23}}{\Delta_s(p)}.$$

У рівнянні (24) матриці $W_{s2}(p)$ і $\bar{v}_s(p)$ розіб'ємо на окремі блоки

$$W_{s2}(p)\bar{v}_s(p) = \begin{bmatrix} w_{11}^{(s2)}(p) & w_{12}^{(s2)}(p) & w_{13}^{(s2)}(p) \\ w_{21}^{(s2)}(p) & w_{22}^{(s2)}(p) & w_{23}^{(s2)}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(p) \\ v_2(p) \\ v_3(p) \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Для блочних матриць введемо такі позначення:

$$\bar{w}^{(s)} = \begin{bmatrix} w_{11}^{(s2)}(p) \\ w_{21}^{(s2)}(p) \end{bmatrix}, \quad W^{(s)} = \begin{bmatrix} w_{12}^{(s2)}(p) & w_{13}^{(s2)}(p) \\ w_{22}^{(s2)}(p) & w_{23}^{(s2)}(p) \end{bmatrix}.$$

Крім того врахуємо, що $v_1(p) = u_2(p)$ і

$$\begin{bmatrix} v_2(p) \\ v_3(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta h \end{bmatrix} = \bar{y}(p).$$

З врахуванням прийнятих позначень, рівняння (31) набуде такого вигляду:

$$W_{s2}(p)\bar{v}_s(p) = \begin{bmatrix} \bar{w}^{(s)} & W^{(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2(p) \\ \bar{y}(p) \end{bmatrix}.$$

Перемноживши блочні матриці між собою, отримаємо

$$W_{s2}(p)\bar{v}_s(p) = \bar{w}^{(s)}u_2(p) + W^{(s)}\bar{y}(p). \quad (31)$$

Якщо у рівнянні (24) вираз $W_{s2}(p)\bar{v}_s(p)$ замінити його значенням із (32), то матимемо:

$$\bar{y}_s(p) = W_{s1}(p)\bar{u}_s(p) + \bar{w}^{(s)}u_2(p) + W^{(s)}\bar{y}(p). \quad (32)$$

Згідно з (25) $\bar{y}(p)$ визначається рівнянням $\bar{y}(p) = W_1(p)\bar{u}(p) + W_2(p)v(p)$. З врахуванням значення $\bar{y}(p)$ рівняння (32) набуде такого вигляду:

$$\bar{y}_s(p) = W_{s1}(p)\bar{u}_s(p) + W^{(s)}W_1(p)\bar{u}(p) + \bar{w}^{(s)}u_2(p) + W^{(s)}W_2(p)v(p).$$

Увівши позначення $W(p) = W^{(s)}W_1(p)$ і $\bar{w}(p) = W^{(s)}W_2(p)$, отримуємо лінеаризовану математичну модель двостадійної сепараційної установки

$$\bar{y}_s(p) = W_{s1}(p)\bar{u}_s(p) + W(p)\bar{u}(p) + \bar{w}^{(s)}u_2(p) + \bar{w}(p)v(p). \quad (33)$$

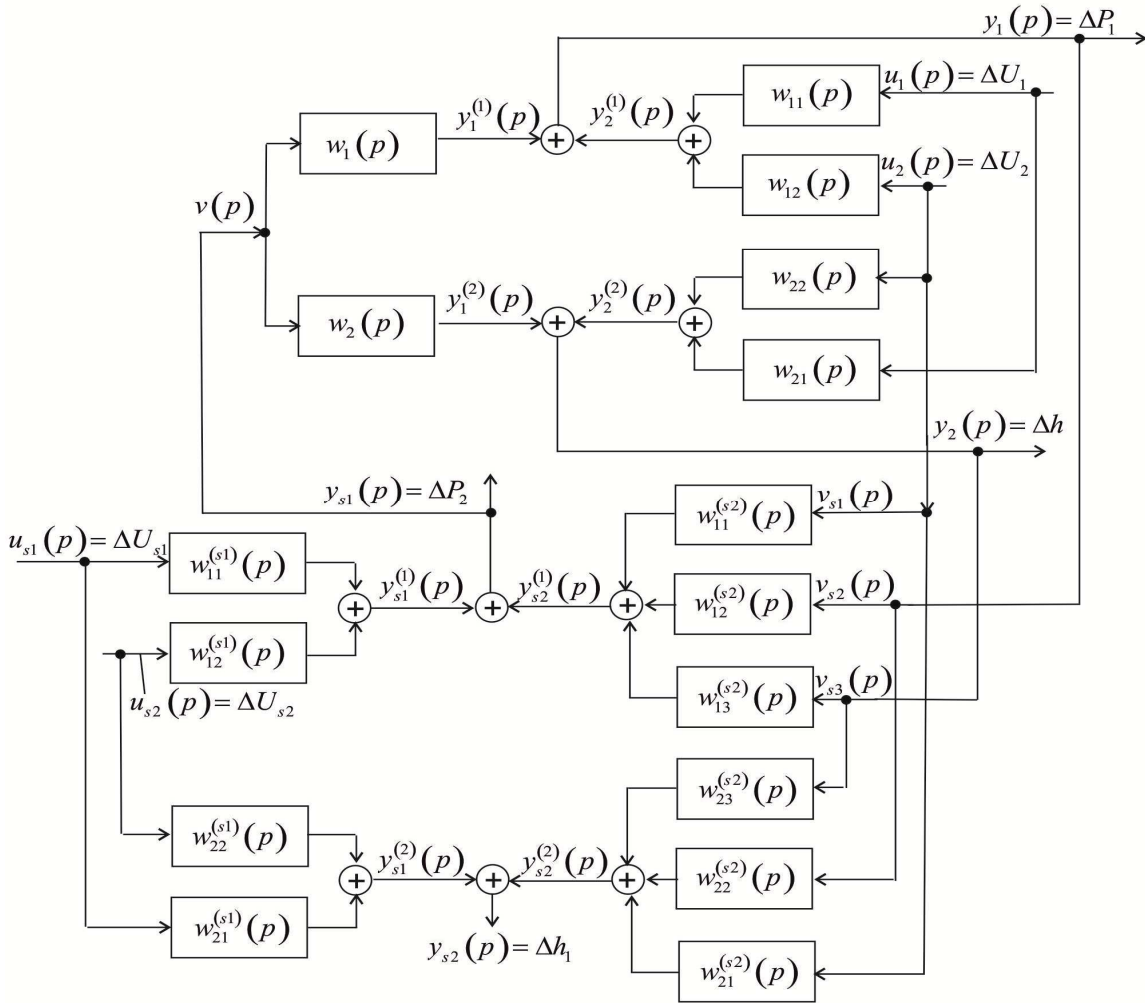


Рисунок 2 – Об’єднана структурна схема передавальних функцій двостадійної сепараційної установки

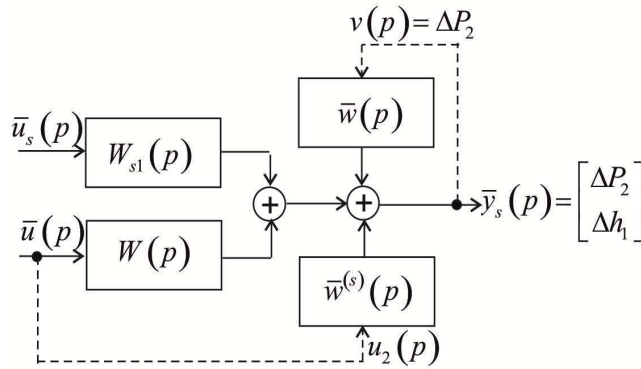


Рисунок 3 – Векторна структурна схема передавальних функцій двостадійної сепараційної установки

Рівняння (33) дає змогу отримати векторну структурну схему [13] двостадійної сепараційної установки (рис. 3).

На рис. 3 пунктирними лініями позначені скалярні зв’язки, які зумовлені дією збурень на об’єкт керування. Як видно із рис. 3, дія збурень (при зроблених раніше допущеннях) викликана зміною тиску в другому сепараторі, а також зміною командного сигналу, який поступає на виконавчий пристрій $ВП_h$ (рис. 1).

Слід зауважити, що скалярна структурна схема двоступеневої сепараційної установки, зображена на рис. 2, є зручною для імітаційного моделювання з метою виявлення її динамічних властивостей, а векторна структурна схема (рис. 3) може бути використана для синтезу законів керування сепараційною установкою.

Висновки

Математична модель двостадійного процесу сепарації, яка отримана у роботі [12], лінеаризована за умови, що зміна вхідних величин є незначною. Це дало змогу нелінійні функції, які входять у математичну модель, розкласти в ряд Тейлора з врахуванням тільки лінійних членів ряду.

Лінеаризована математична модель дала змогу визначити матричні передавальні функції об'єкта та побудувати структурні схеми як кожної ступені сепарації окремо, так і сепараційної установки в цілому. Проаналізувавши структурні матричні передавальні функції, а також структурні схеми, можна зробити висновок, що об'єкт керування характеризується перехресними зв'язками між вхідними і вихідними величинами, що ускладнює процес керування таким об'єктом.

Отримана лінеаризована модель сепараційної установки буде використана для виявлення таких властивостей об'єкта як спостережливості та керованості, а також для синтезу автоматичної системи керування процесом сепарації нафти.

Література

1 Лазута И. В. Технологические процессы, оборудование и автоматизация нефтегазодобычи: уч. пособие / И. В. Лазута, Р. Ю. Сухарев. – Омск: СибАДИ, 2015. – 160 с.

2 Каспарьянц К. С. Процессы и аппараты для объектов промышленной подготовки нефти и газа: монография / К. С. Каспарьянц, В. И. Кузин, Л. Г. Григорян. – М.: Недра, 1977. – 254 с.

3 Ланчаков Г. А. Технологические процессы подготовки природного газа и методы расчета оборудования: монография / Г. А. Ланчаков, А. Н. Кульков, Г. К. Зиберт. – М.: Недра, 2000. – 279 с.

4 Лутошкин Г. С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды: учебник для вузов / Г. С. Лутошкин. – М.: Альянс, 2005. – 320 с.

5 Ляпощенко О. О. Гідродинаміка інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв очищення природного газу: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Ляпощенко Олександр Олександрович. – Суми, 2006. – 135 с.

6 Мильштейн Л. М. Нефтегазопромышленная сепарационная техника: справочное пособие / Л. М. Мильштейн, С. И. Бойко, Е. П. Запорожец; под ред. Л. М. Мильштейна. – М.: Недра, 1992. – 236 с.

7 Персиянцев М. Н. Совершенствование процессов сепарации нефти от газа в промышленных условиях / М. Н. Персиянцев. – М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 1999. – 283 с.

8 Горбійчук М. І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтогазовій промисловості: навчальний посібник / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ: Факел, 1999. – Ч. II. – 1999. – 226 с.

9 Кулінченко Г. В. Формування підходу до побудови регулятора процесу низькотемпературної сепарації природного газу / Г. В. Кулінченко, А. В. Павлов, П. В. Леонтьєв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Автоматика та інформаційно-вимірвальна техніка. – 2015. – №6. – С. 9 – 17.

10 Тугов В. В. Разработка математического обеспечения оптимального проектирования и автоматического управления технологического процесса дегазации нефти: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Тугов Виталий Валерьевич. – Оренбург, 2002. – 208 с.

11 Devold H. Oil and gas production handbook. An introduction to oil and gas production / H. Devold - ABB ATPA Oil and Gas, 2006. – 84 p.

12 Горбійчук М. І. Розроблення математичної моделі установки двостадійної сепарації / М. І. Горбійчук, Д. Д. Поварчук, Н. Т. Лазорів, Т. В. Гуменюк. – Режим доступу: http://sis-journal.com/wp-content/uploads/2017/09/SIS-journal_9.pdf

13 Справочник по теории автоматического управления / [А.Г. Александров, В.М. Артемьев, И.Н. Белоглазов и др.]; под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
17.08.17*

*Рекомендована до друку
професором Олійником А.П.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором Мещеряковим Л.І.
(ДВНЗ «Національний гірничий університет»,
м. Дніпро)*