

Ж. П. Дусанюк¹
 О. В. Дерібо¹
 С. В. Репінський¹
 Т. В. Муравинець¹
 С. О. Козачишен¹

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB SIMULINK ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ З ДОВГОЮ НАПІРНОЮ ГІДРОЛІНІЄЮ

¹Вінницький національний технічний університет

Розроблені і апробовані математична модель гідроприводу поступального руху з довгою напірною гідролінією та обчислювальна структура для імітаційного дослідження в середовищі MATLAB Simulink динамічних процесів у такому приводі.

Ключові слова: гідропривід поступального руху, довга напірна гідролінія, математична модель, обчислювальна структура, середовище MATLAB Simulink, динамічні процеси, хвильові процеси.

Вступ і постановка задачі

В гідроприводах машин різного призначення (технологічних, будівельних, транспортних, сільськогосподарських, гірничих та інших) у випадках, коли виконавчий двигун розташований на значній відстані від гідростанції, використовуються довгі напірні гідролінії. Під час роботи машини з такими гідролініями в перехідних режимах її роботи можуть виникати хвильові процеси (нестаціонарний рух рідини), які впливають на якість її функціонування. Підходи до врахування впливу хвильових процесів під час моделювання гідроприводів запропоновані в роботах [1—3]. Теоретичні та експериментальні дослідження динаміки гідроприводів з довгими напірними гідролініями розглянуті в роботах [4—7]. Разом з тим, і тепер під час проектування гідроприводів з довгими напірними гідролініями актуальною задачею залишається швидке і всебічне виявлення впливу структури приводу, його параметрів і параметрів навантаження на характеристики перехідних процесів. На сьогодні ефективним засобом розв'язання такої задачі є використання програмного середовища імітаційного моделювання MATLAB Simulink.

Метою роботи є створення і апробація математичної моделі гідроприводу поступального руху з довгою напірною гідролінією, яка була б придатна для імітаційного дослідження динаміки такого приводу в середовищі MATLAB Simulink.

Основна частина

Розрахункова схема гідроприводу з довгою напірною гідролінією показана на рис. 1.

Гідропривод включає насос постійної продуктивності 1, розподільник 2, гідроциліндр 3, запобіжний клапан 4, об'єкт керування 5.

Під час моделювання гідроприводу досліджуватимуться динамічні процеси, які спричинятимуться миттєвою зміною технологічного навантаження на об'єкті керування.

Математична модель гідроприводу складена за таких припущень:

- робоча рідина — пружна система, яка в процесі деформування підпорядковується закону Гука і має на елементарних ділянках певної довжини однакову густину;
- швидкість руху газової та рідинної фаз робочої рідини однакові;
- швидкість руху рідини набагато менша швидкості звуку;
- режим течії робочої рідини в гідролініях — ламінарний;

- об'єм поршневої порожнини гідроциліндра є сталою величиною;
- сила тертя рідини об стінку гідролінії в нестаціонарному русі така, як і в стаціонарному зі швидкістю, що дорівнює миттєвій швидкості процесу, який розглядається;
- довжина гідролінії між насосом і розподільником незначна і тому хвильовими процесами у ній можна знехтувати.
- площа поперечного перерізу отвору трубопроводу напірної гідролінії не змінюється по всій її довжині.

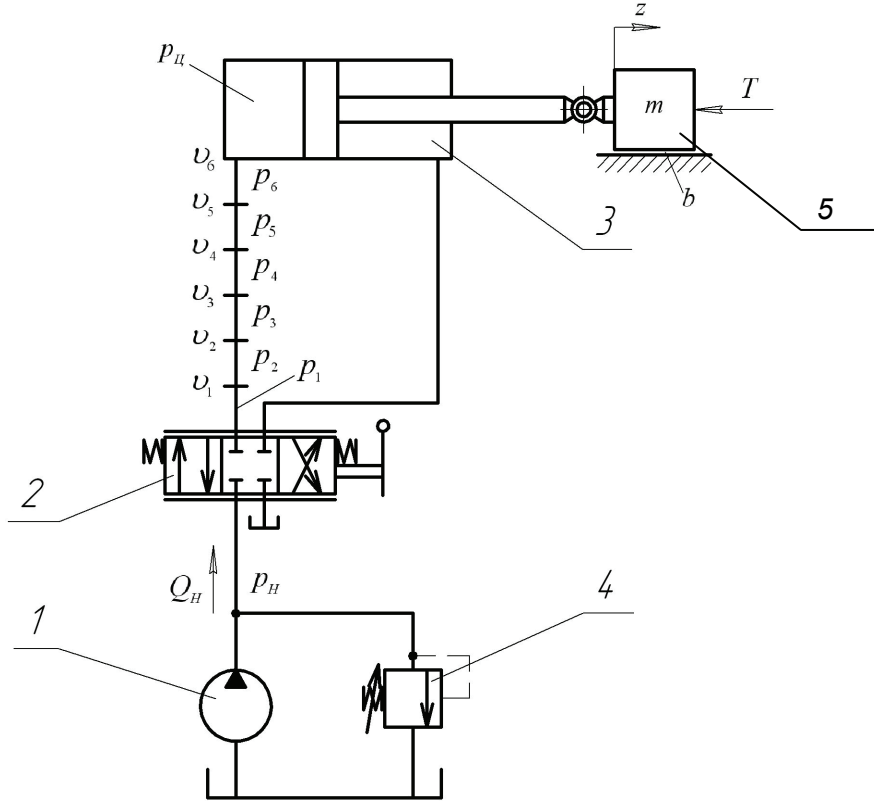


Рис. 1. Розрахункова схема гідроприводу з довгою напірною гідролінією

Відповідно до рис. 1 і припущень математичну модель гідроприводу складають такі рівняння. Рівняння нерозривності потоку рідини в трубопроводі між насосом і розподільником

$$Q_H = \frac{dp_H}{dt} \beta W_H + Q_p \quad (1)$$

Рівняння витрати рідини через розподільник

$$Q_p = \mu f_p \sqrt{\frac{2(p_H - p_p)}{\rho}} \quad (2)$$

Рівняння швидкості рідини на вході в першу ділянку трубопроводу напірної гідролінії (на виході розподільника)

$$v_p = \frac{Q_p}{f_1} \quad (3)$$

Рівняння в частинних похідних, які описують хвильові процеси в довгому напірному трубопроводі [3]:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x} = -\frac{1}{E_n} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial x} = -\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} \right) - \xi_i v_i. \quad (5)$$

Для включення рівнянь хвильових процесів в імітаційну обчислювальну структуру використано різницевий метод [4] перетворення рівнянь в частинних похідних (3) і (4) до системи звичайних диференціальних рівнянь. В результаті таких перетворень отримано систему звичайних диференціальних рівнянь, які описують рух рідини в окремих ділянках напірної гідролінії:

$$\begin{aligned} \frac{dp_p}{dt} &= \frac{E}{h}(v_p - v_1); & \frac{dp_1}{dt} &= \frac{E}{h}(v_1 - v_2); & \frac{dp_2}{dt} &= \frac{E}{h}(v_2 - v_3); & \frac{dp_3}{dt} &= \frac{E}{h}(V_3 - V_4); \\ \frac{dp_4}{dt} &= \frac{E}{h}(v_4 - v_5); & \frac{dp_5}{dt} &= \frac{E}{h}(v_5 - v_6); & \frac{dv_1}{dt} &= \frac{2}{h\rho}(p_p - p_1) - \frac{\xi_1 v_1}{\rho}; \\ \frac{dv_2}{dt} &= \frac{1}{h\rho}(p_1 - p_2) - \frac{\xi_2 v_2}{\rho}; & \frac{dv_3}{dt} &= \frac{1}{h\rho}(p_2 - p_3) - \frac{\xi_3 v_3}{\rho}; & \frac{dv_4}{dt} &= \frac{1}{h\rho}(p_3 - p_4) - \frac{\xi_4 v_4}{\rho}; \\ \frac{dv_5}{dt} &= \frac{1}{h\rho}(p_5 - p_6) - \frac{\xi_5 v_5}{\rho}; & \frac{dv_6}{dt} &= \frac{2}{h\rho}(p_6 - p_u) - \frac{\xi_6 v_6}{\rho}. \end{aligned} \quad (6)$$

Рівняння зв'язку між подачею рідини в поршневу порожнину гідроциліндра і швидкістю її руху в шостій (кінцевій) ділянці напірної гідролінії

$$Q_{\text{ц}} = v_6 f_6. \quad (7)$$

Рівняння нерозривності потоку рідини в поршневій порожнині гідроциліндра

$$Q_{\text{ц}} = \frac{dp_{\text{ц}}}{dt} \beta W_{\text{ц}} + \frac{dz}{dt} F_{\text{ц}}. \quad (8)$$

Рівняння сил, що діють на поршень гідроциліндра

$$P_{\text{ц}} = m \frac{d^2 z}{dt^2} + b \frac{dz}{dt} + T. \quad (9)$$

Рівняння тиску в поршневій порожнині гідроциліндра

$$p_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{ц}}}{F_{\text{ц}}}. \quad (10)$$

В рівняннях (1—3) і (6—10) використані такі позначення: $Q_{\text{н}}$ — подача насоса; $Q_{\text{ц}}$ — подача рідини в поршневу порожнину гідроциліндра; $p_{\text{н}}$ — тиск в лінії нагнітання (на виході насоса); $p_{\text{ц}}$ — тиск в поршневій порожнині гідроциліндра; $W_{\text{н}}$ — об'єм лінії нагнітання, $W_{\text{ц}}$ — об'єм в поршневій порожнині гідроциліндра; m — зведена маса рухомих частин об'єкта керування; z — переміщення об'єкта керування; $v = \frac{dz}{dt}$ — швидкість об'єкта керування; f_p — площа робочого вікна розподільника; f_1, f_6, f_m — відповідно, площі отворів трубопроводу напірної гідролінії на першій, шостій і решті ділянок; z — координата переміщення поршня гідроциліндра; b — зведений коефіцієнт швидкісного навантаження на штокові гідроциліндра; T — технологічне навантаження на шток гідроциліндра; $F_{\text{ц}}$ — ефективна площа поршня гідроциліндра; $\beta = \frac{1}{E_p}$ — коефіцієнт стисливості робочої рідини; E_p — модуль пружності робочої рідини; ρ — густина робочої рідини; μ — коефіцієнт витрати робочого вікна розподільника; i — номер ділянки напірної гідролінії; $\xi_1 \dots \xi_6$ — коефіцієнти питомого опору кожної з окремих ділянок напірної гідролінії; v_p — швидкість руху робочої рідини на початку першої ділянки напірної гідролінії (на виході з розподільника);

$v_1 \dots v_6$ — швидкості руху робочої рідини в кінці кожної з окремих ділянок напірної гідролінії; p_p — тиск робочої рідини на виході розподільника; $p_1 \dots p_6$ — тиски в середній частині кожної з окремих ділянок напірної гідролінії; $p_{ц}$ — тиск робочої рідини на вході в гідроциліндр; E — зведений модуль пружності ділянок напірної гідролінії; $h = \frac{L}{n}$ — крок дискретизації, L — довжина трубопроводу напірної гідролінії; n — кількість ділянок, на які розбито напірну гідролінію по довжині.

Зведений модуль пружності E , який залежить від модулів пружності робочої рідини E_p та стінок трубопроводу напірної гідролінії E_m , визначається за формулою [1]:

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_p} + \frac{d_m}{\delta_m} \cdot \frac{1}{E_m}}, \quad (11)$$

де d_m і δ_m — відповідно, внутрішній діаметр і товщина стінки трубопроводу напірної гідролінії.

З використанням рівнянь (1—10) записані рівняння зв'язків між сигналами (змінними параметрами) математичної моделі у формі, придатній для використання в обчислювальній структурі.

$$p_{н} = \left(\frac{v_p \cdot f_1}{\mu \cdot f_p \sqrt{\frac{2}{\rho}}} \right)^2 + p_p; \quad (12)$$

$$v_p = \frac{Q_{н}}{f_1} - \frac{\beta W_{н}}{f_1} \cdot \frac{dp_{н}}{dt}; \quad (13)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{v_6 f_6}{F_{ц}} - \frac{\beta W_{ц}}{F_{ц}} \cdot \frac{dp_{ц}}{dt}; \quad (14)$$

$$v_1 = v_p - \frac{h}{E} \frac{dp_p}{dt}; \quad v_2 = v_1 - \frac{h}{E} \frac{dp_1}{dt}; \quad v_3 = v_2 - \frac{h}{E} \frac{dp_2}{dt}; \quad (15)$$

$$v_4 = v_3 - \frac{h}{E} \frac{dp_3}{dt}; \quad v_5 = v_4 - \frac{h}{E} \frac{dp_4}{dt}; \quad v_6 = v_5 - \frac{h}{E} \frac{dp_5}{dt}.$$

$$p_6 = \frac{dv_6}{dt} \cdot \frac{h \cdot \rho}{2} + v_6 \frac{\xi \cdot h}{\rho} + p_{ц}; \quad p_5 = \frac{dv_5}{dt} \cdot h \cdot \rho + v_5 \frac{\xi \cdot h}{\rho} + p_6; \quad p_4 = \frac{dv_4}{dt} \cdot h \cdot \rho + v_4 \frac{\xi \cdot h}{\rho} + p_5;$$

$$p_3 = \frac{dv_3}{dt} \cdot h \cdot \rho + v_3 \frac{\xi \cdot h}{\rho} + p_4; \quad p_2 = \frac{dv_2}{dt} \cdot h \cdot \rho + v_2 \frac{\xi \cdot h}{\rho} + p_3; \quad (16)$$

$$p_1 = \frac{dv_1}{dt} \cdot h \cdot \rho + v_1 \frac{\xi \cdot h}{\rho} + p_2; \quad p_p = \frac{dv_p}{dt} \cdot \frac{h \cdot \rho}{2} + v_p \frac{\xi \cdot h}{\rho} + p_1.$$

Структурна схема математичної моделі гідроприводу з довгою напірною гідролінією, побудована основі рівнянь (1—3) та (12—16), показана на рис. 2. Ця схема наочно відображає всі зв'язки між рівняннями (розрахунковими блоками) і суттєво спрощує розробку обчислювальної структури в середовищі MATLAB Simulink.

Для оцінювання працездатності розробленої обчислювальної структури виконане її тестування. Для цього в середовищі MATLAB Simulink отримані графіки перехідних процесів в гідроприводі, спричинених ступінчастою зміною технологічного навантаження (рис. 3).

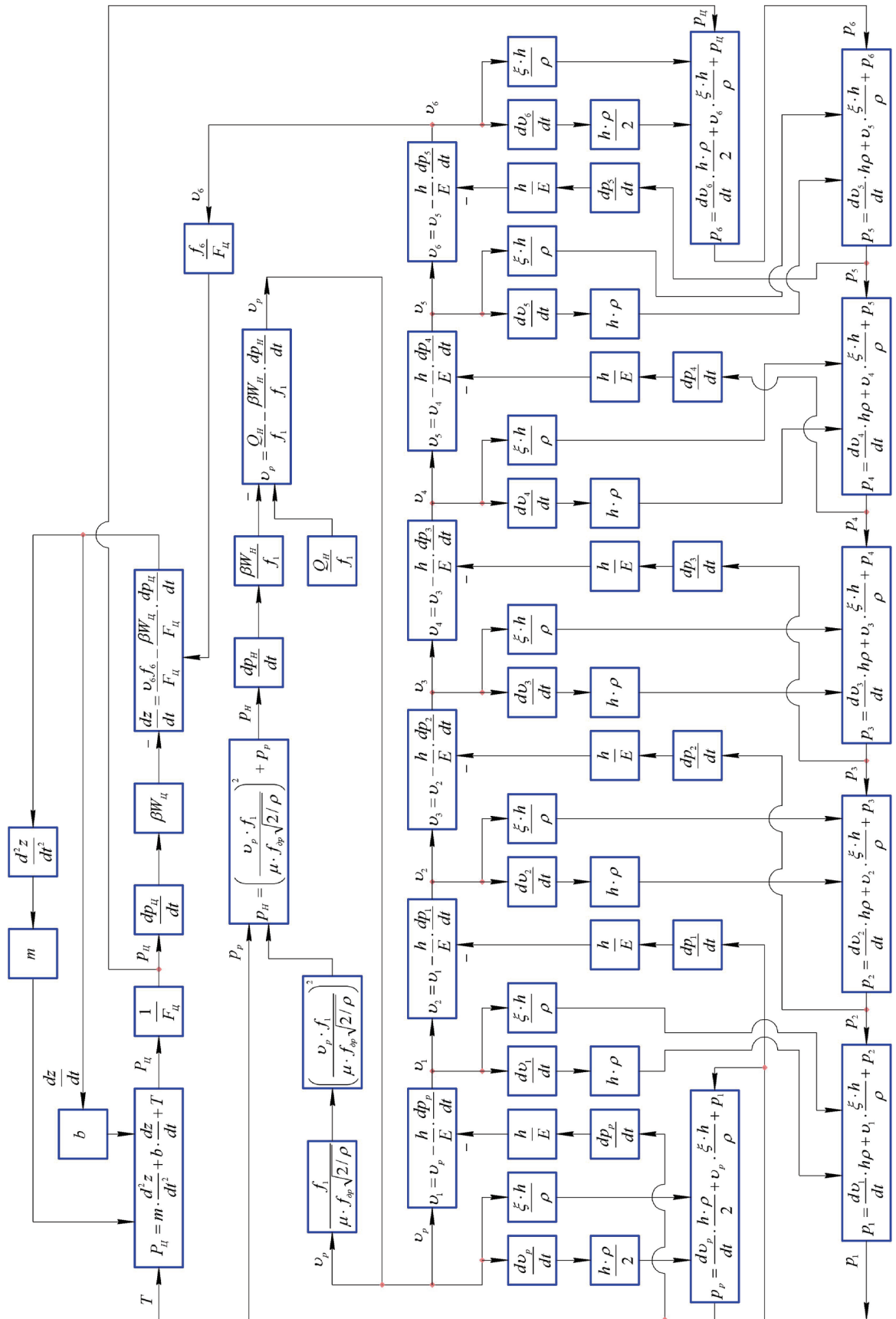


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі гідропроводу поступального руху з довгою напірною гідролінією

Тестування проводилось за таких параметрів гідроприводу: $Q_H = 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; $W_H = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $W_{\text{ц}} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $m = 60 \text{ кг}$; $f_p = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $d_m = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $f_m = f_1 = f_6 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $b = 2000 \text{ Н/с}\cdot\text{м}$; $F_{\text{ц}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $\beta = 0,625 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{Н}$; $E_p = 1,6 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$; $E_m = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$; $\delta_m = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\rho = 912 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 0,79$; $\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = \xi_6 = \xi = 3 \cdot 10^3 \text{ кг/ м}^3 \cdot \text{с}$; $L = 12 \text{ м}$; $n = 6$; $h = 2 \text{ м}$.

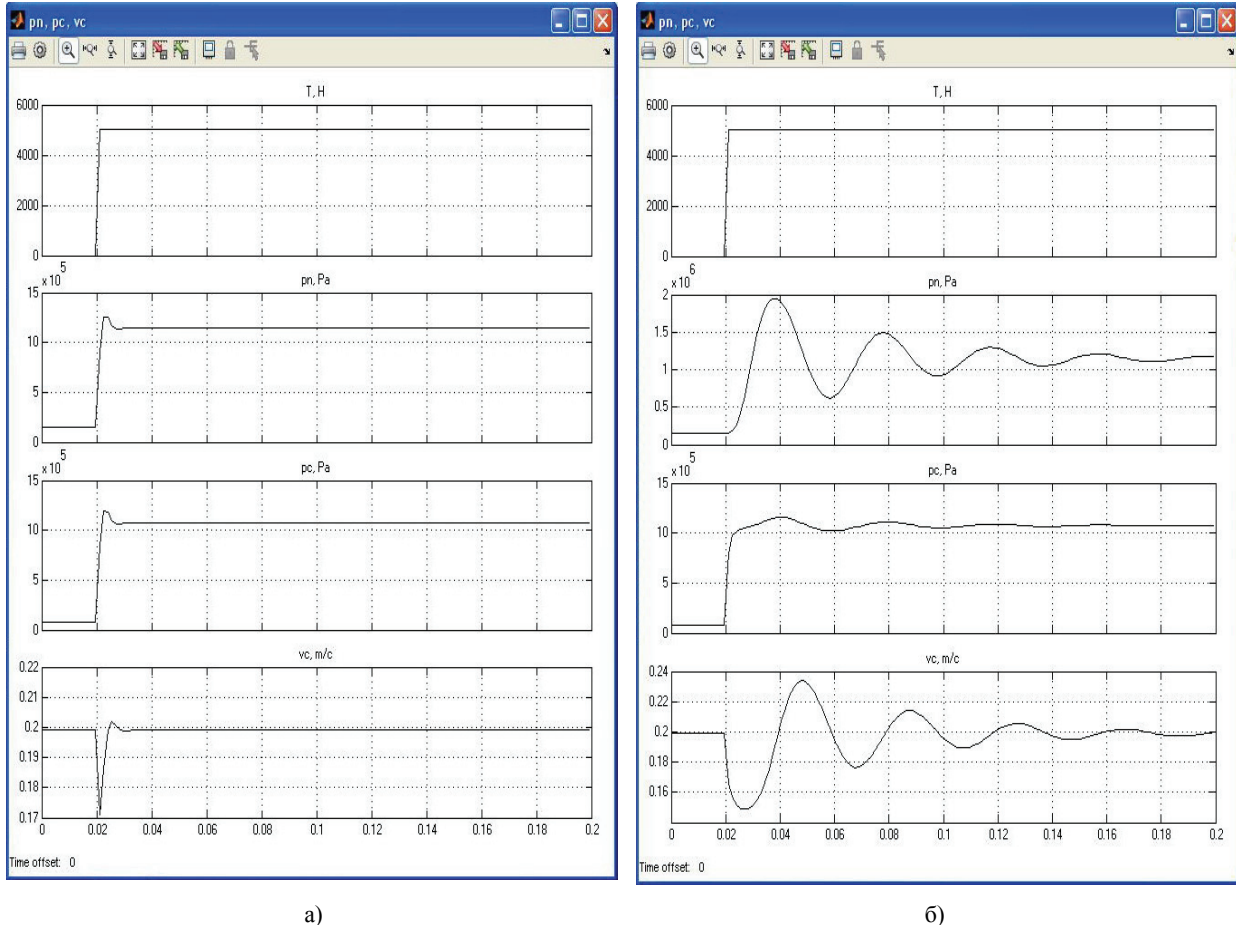


Рис. 3. Перехідні процеси в гідроприводі: а — без урахування і б — з урахуванням хвильових процесів у напірній гідролінії; (зверху вниз): технологічне навантаження T ; тиск на виході насоса p_n ; тиск в гідроциліндрі $p_{\text{ц}}$; швидкість руху об'єкта керування v

На рис. 3а показано перехідний процес в гідроприводі з короткою напірною гідролінією, тобто без урахування хвильових процесів, а на рис. 3б — перехідний процес в гідроприводі з довгою напірною гідролінією. Параметри гідроприводу і гідролінії, а також параметри навантаження наведені вище. Перехідний процес, в цьому випадку, спричинений ступінчастою зміною технологічного навантаження T від 0 до 5 кН.

Детальний опис обчислювальної структури, результати імітаційного моделювання та їхня інтерпретація будуть розглянуті у наступній статті авторів.

Висновки

1. Розроблено математичну модель гідрориводу поступального руху, яка враховує рівняння хвильових процесів у напірній гідролінії. Цю математичну модель представлено у вигляді структурної схеми, яка наочно відображає всі зв'язки між рівняннями (розрахунковими блоками).

2. Для перевірки працездатності запропонованої моделі і обчислювальної структури проведені тестові імітаційні дослідження перехідного процесу в гідроприводі, спричиненого ступін-

частою зміною технологічного навантаження без урахування та з урахуванням хвильових процесів в довгій гідролінії.

3. В подальших дослідження передбачається дослідити вплив параметрів приводу на характеристики хвильових процесів (величину максимального тиску в гідросистемі, розподіл швидкостей руху рідини і тисків в рідині по ділянках гідролінії), а також на параметри руху об'єкта керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Попов Д. Н. Нестационарные гидромеханические процессы / Д. Н. Попов — М. : Машиностроение, 1982. — 240 с.
2. Навроцкий К. Л. Комбинированный метод расчета волновых процессов в длинных гидролиниях объёмных гидроприводов / К. Л. Навроцкий // Вестник машиностроения. — 1982. — № 2. — С. 42—49.
3. Тарко Л. М. Переходные процессы в гидравлических механизмах / Л. М. Тарко. — М. : Машиностроение, 1973. — 163 с.
4. Дусанюк Ж. П. Волновые процессы в гидросистемах с нелинейными упругими свойствами трубопровода : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.03 / Ж. П. Дусанюк. — Винница, 1990. — 250 с.
5. Иванов М. І. Імітаційні дослідження хвильових процесів у довгих гідравлічних лініях гідросистем сільськогосподарських машин / М. І. Иванов, С. В. Репінський, С. В. Дусанюк // Вибрации в технике и технологиях. — 2003. — № 4 (30). — С. 69—72.
6. Дусанюк Ж. П. Вплив параметрів довгої гідролінії на характеристики руху вихідної ланки гідроприводу / Ж. П. Дусанюк, С. В. Репінський, С. В. Дусанюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2003. — № 5. — С. 73—77.
7. Математичне моделювання робочих процесів у гідроприводі, чутливому до навантаження з довгими робочими гідролініями / О. В. Петров, Л. Г. Козлов, Ж. П. Дусанюк, А. В. Черниш // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. — 2014. — № 1. — С. 187—192. — (Технічні науки).

Рекомендована кафедрою технологій та автоматизації машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 25.04.2016

Дусанюк Жанна Павлівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування;

Дерібо Олександр Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування;

Репінський Сергій Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування;

Муравинець Тарас Васильович — студент факультету машинобудування та транспорту;

Козачишен Сергій Олександрович — студент факультету машинобудування та транспорту.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Zh. P. Dusaniuk¹
O. V. Deribo¹
S. V. Repinskyi¹
T. V. Muravynets¹
S. O. Kozachyshen¹

Mathematical Model for Imitation Research in the Environment of Matlab Simulink Hydraulic Drive of Forward Motion with a Long Pressure Hydroline

¹Vinnitsia National Technical University

The mathematical model of the hydraulic drive of forward motion with a long pressure hydroline and calculable structure has been worked out for imitation research in the environment of MATLAB Simulink dynamic processes in such a drive.

Keywords: hydraulic drive of forward motion, long pressure hydroline, mathematical model, calculable structure, structure, environment of MATLAB Simulink, dynamic processes, wave processes.

Dusaniuk Zhanna P. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technologies and Automation;

Deribo Oleksandr V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technologies and Automation;

Repinskyi Serhii V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technologies and Automation;

Muravynets Taras V. — Student of the Faculty of Mechanical Engineering and Transport;

Kozachyshen Serhii O. — Student of the Faculty of Mechanical Engineering and Transport

Ж. П. Дусанюк¹

А. В. Дерибо¹

С. В. Репинский¹

Т. В. Муравинец¹

С. А. Козачишен¹

Математическая модель для имитационного исследования в среде MATLAB Simulink гидравлического привода поступательного движения с длинной напорной гидролинией

¹Вінницький національний технічний університет

Разработаны и апробированы математическая модель гидропривода поступательного движения с длинной напорной гидролинией и вычислительная структура для имитационного исследования в среде MATLAB Simulink динамических процессов в таком поводе.

Ключевые слова: гидропривод поступательного движения, длинная напорная гидролиния, математическая модель, вычислительная структура, структура, среда MATLAB Simulink, динамические процессы, волновые процессы.

Дусанюк Жанна Павловна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологий и автоматизации машиностроения;

Дерибо Александр Владимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологий и автоматизации машиностроения;

Репинский Сергей Владимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологий и автоматизации машиностроения;

Муравинец Тарас Васильевич — студент факультета машиностроения и транспорта;

Козачишен Сергей Александрович — студент факультета машиностроения и транспорта