

УДК 624.131

Г. С. Ратушняк, к. т. н., проф.;

О. Б. Волошин

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОПРИВОДУ СТАБІЛОМЕТРА НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИПРОБОВУВАНОВОГО ЗРАЗКА ҐРУНТУ

Розроблено математичну модель гідроприводу стабілометра для циклічного навантаження зразка ґрунту. Отримано математичні вирази для визначення динамічних характеристик ґрунту. Виявлено характер впливу робочих параметрів гідроприводу стабілометра на динамічні характеристики ґрунту, що визначаються.

Вступ

За результатами експерименту для визначення динамічних характеристик ґрунтів у підвалинах споруд використовуються методи вимушених резонансних коливань та передавальної функції [1, 2]. Для визначення комплексу характеристик ґрунтів в умовах складного об'ємного навантаження використовуються установки тривісного навантаження ґрунтів (стабілометри) [3]. Але в процесі випробувань зразків у стабілометрах не враховується вплив параметрів приводу самої установки на виміряні значення динамічних характеристик ґрунту. Це обумовлює невисоку точність результатів випробувань.

Постановка задачі

Задачею дослідження є розробка математичної моделі, яка б дозволила виявити вплив робочих параметрів гідроприводу стабілометра на точність вимірювання динамічних характеристик випробованого зразка ґрунту при циклічному навантаженні, визначити динамічні характеристики ґрунту за методом передавальної функції з урахуванням впливу на них параметрів самої установки та виявити характер цього впливу.

Результати дослідження

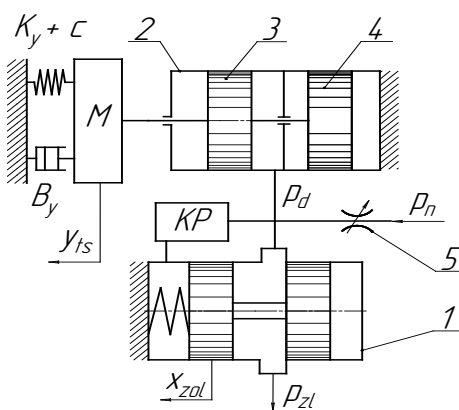


Рис. 1. Розрахункова схема коливальної системи: стабілометр із гідроприводом—зразок ґрунту

Розглянемо процес одновісного циклічного навантаження зразка ґрунту штампом стабілометра з гідроприводом, який розглянуто у роботі [4]. Розрахункову схему коливальної системи: стабілометр із гідроприводом—зразок ґрунту, показано на рис. 1. На розрахунковій схемі: 1 — основний каскад електрогідролічного підсилювача; 2 — подвійний гідроциліндр, який містить гідроциліндр динамічного навантаження зразка ґрунту з поршнем 3 та гідроциліндр статичного навантаження зразка ґрунту з поршнем 4; 5 — регулювальний дросель; *КР* — коректувальний пристрій; *М* — зведена маса рухомих елементів стабілометра із приєднаною масою ґрунту; K_y — коефіцієнт жорсткості зразка ґрунту [5]; B_y — коефіцієнт демпфування зразка ґрунту [5]; y_{ts} — хід штока гідроциліндра динамічного навантаження; c — сумарна жорсткість пружин упорів штампа; x_{zol} — хід золотника основного каскаду 1; p_n , p_d , p_{zl} — відповідно поточний тиск в напірній гідромагістралі, напірній гідролінії гідроциліндра динамічного навантаження і тиск зливу.

Рівняння витрати робочої рідини в напірній гідролінії гідроциліндра динамічного навантаження:

$$Q_d = F_{ts} \frac{dy_{ts}}{dt} + W\beta \frac{dp_d}{dt} + F_{zol} \frac{dx_{zol}}{dt}, \quad (1)$$

де F_{ts}, F_{zol} — відповідно площі поршня гідроциліндра динамічного навантаження 2 та торця золотника основного каскаду електрогідравлічного підсилювача 1; W, β — сумарний об'єм і зведений коефіцієнт стисливості робочої рідини гідроприводу динамічного навантаження.

Крім того, рівняння витрати робочої рідини через проточну камеру, яка утворена дроселем 5 та дросельним вікном основного каскаду 1

$$Q_d = G_{dr} \sqrt{p_n - p_d} - G_{zl} \sqrt{p_d - p_{zl}}, \quad (2)$$

де G_{dr}, G_{zl} — гідравлічна провідність дроселя 3 і основного каскаду 1 [6].

Порівнявши та розклавши нелінійні рівняння (1) і (2) в ряд Тейлора навколо точки рівноважного стану з параметрами: $p_{n0}, p_{d0}, x_{zol0}, G_{zl0}$ в момент часу t_0 [6], дістанемо лінеаризоване рівняння витрат у малих відхиленнях змінних $y_{ts}^*, p_d^*, x_{zol}^*$:

$$F_{ts} \frac{dy_{ts}^*}{dt} + F_c p_d^* + W\beta \frac{dp_d^*}{dt} = k_{Qx} x_{zol}^* + F_{zol} \frac{dx_{zol}^*}{dt}, \quad (3)$$

де $F_c = k_{Qpn} + k_{Qpzl}$ — фактор стійкості основного каскаду 1 [7]; $k_{Qpn} = \frac{G_{dr}}{2\sqrt{p_{n0} - p_{d0}}}$ — коефі-

цієнт передачі дроселя 3; $k_{Qpzl} = \frac{G_{zl0}}{2\sqrt{p_{d0} - p_{zl}}}$ — коефіцієнт ковзання навантажувальної характе-

ристики золотника основного каскаду 1; $k_{Qx} = G_{zl0} \sqrt{p_{d0} - p_{zl}}$ — коефіцієнт підсилення за витратою основного каскаду 1.

З урахуванням того, що реакція ґрунту, який приймаємо в'язко пружним лінійно деформівним тілом [1, 5], має вигляд

$$R_y = K_y y_{ts} + B_y \frac{dy_{ts}}{dt}, \quad (4)$$

рівняння потенційних сил, які діють на поршні подвійного гідроциліндра 2, має вигляд

$$M \frac{d^2 y_{ts}}{dt^2} = p_d F_{ts} - F_T \text{sign} \frac{dy_{ts}}{dt} - \alpha_T \frac{dy_{ts}}{dt} - c(y_{ts} + y_0) - R_y + c_g(y_{ts} + y_{tsn0}), \quad (5)$$

де α_T, F_T — відповідно коефіцієнт в'язкого тертя і стала сили сухого тертя в рухомих з'єднаннях стабілометра; y_0 — початкова деформація пружин упорів штамп; y_{tsn0} — початкова деформація

«гідравлічної пружини» гідроциліндра статичного навантаження з жорсткістю $c_g = \frac{F_n^2}{W_{st} \beta_{st}}$ та

площею поршня 4 F_n ; W_{st}, β_{st} — відповідно сумарний об'єм та зведений коефіцієнт стисливості робочої рідини в гідроциліндрі статичного навантаження.

Лінеаризуємо нелінійне рівняння (5) біля точки рівноважного стану з параметрами p_{d0}, y_{ts0} у момент часу t_0 . Внаслідок дістанемо лінеаризоване рівняння в малих відхиленнях змінних y_{ts}^*, p_d^* і R_y^* :

$$M \frac{d^2 y_{ts}^*}{dt^2} = p_d^* F_{ts} - (k_{ts} + \alpha_T) \frac{dy_{ts}^*}{dt} - (c - c_g) y_{ts}^* - R_y^*, \quad (6)$$

де k_{ts} — еквівалентний коефіцієнт в'язкого тертя в рухомих з'єднаннях робочої камери та подвійного гідроциліндра 2 [6].

Розв'яжемо систему рівнянь (3) та (6). Внаслідок матимемо:

$$\begin{aligned} & \frac{d^3 y_{ts}^*}{dt^3} T_g T_m^2 + \frac{d^2 y_{ts}^*}{dt^2} (T_m^2 + 2\xi T_m T_g) + \frac{d y_{ts}^*}{dt} (2\xi T_m + T_g + B T_m^2) + y_{ts}^* = \\ & = - \left(R_y^* + \frac{d R_y^*}{dt} T_g \right) k_R + \left(x_{zol}^* + \frac{d x_{zol}^*}{dt} T_{zol} \right) k_{Xzol}, \end{aligned} \quad (7)$$

де $T_m = \sqrt{\frac{M}{c - c_g}}$ — механічна стала часу установки; $\xi = \frac{k_{ts} + \alpha_T}{2\sqrt{M(c - c_g)}}$ — коефіцієнт відносного

демпфування гідроприводу; $T_g = \frac{W\beta}{F_c}$ — гідравлічна стала часу гідроприводу; $B = \frac{F_{ts}^2}{F_c}$ — коефіці-

єнт жорсткості механічної характеристики гідроприводу; $k_{Xzol} = \frac{k_{px} F_{ts}}{c - c_g}$ — передавальний коефіці-

єнт гідроприводу за регулювальною дією $X_{zol}(s)$ золотника основного каскаду 1; k_{px} — коефіці-

єнт підсилення за тиском основного каскаду 1; $k_R = \frac{1}{c - c_g}$ — передавальний коефіцієнт гідроприводу за дією реакції ґрунту $R_y(s)$.

Рівняння (7) з нульовими початковими умовами у зображеннях:

$$Y_{ts}(s) \left[(T_m^2 s^2 + 2\xi T_m s + 1)(T_g s + 1) + T_{ts} s \right] = k_{Xzol} (T_{zol} s + 1) X_{zol}(s) - k_R (T_g s + 1) R_y(s), \quad (8)$$

де s — оператор Лапласа; $T_{ts} = \frac{B}{c - c_g}$, $T_{zol} = \frac{F_{zol}}{k_{Qx}}$ — сталі часу.

Передавальні функції гідроприводу стабілометра відповідно за реакцією ґрунту $R_y(p)$ та за регулювальною дією золотника $X_{zol}(s)$:

$$W_R(s) = \frac{Y_{ts}(s)}{R_y(s)} = - \frac{k_R (T_g s + 1)}{(T_m^2 s^2 + 2\xi T_m s + 1)(T_g s + 1) + T_{ts} s} = - \frac{b_{01} + b_{11} s}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}; \quad (9)$$

$$W_{Xzol}(s) = \frac{Y_{ts}(s)}{X_{zol}(s)} = \frac{k_{Xzol} (T_{zol} s + 1)}{(T_m^2 s^2 + 2\xi T_m s + 1)(T_g s + 1) + T_{ts} s} = \frac{b_{02} + b_{12} s}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \quad (10)$$

де $a_1, a_2, a_3, b_{01}, b_{11}, b_{02}, b_{12}$ — сталі коефіцієнти відповідних поліномів.

Рівняння переміщення золотника основного каскаду 1 покажемо у вигляді

$$X_{zol}(j\omega) = X_{zol}(\omega) e^{j\omega t}, \quad (11)$$

де $X_{zol}(\omega)$ — модуль (амплітуда) комплексної функції $X_{zol}(j\omega)$; ω — кутова частота переміщення золотника.

Переміщення штампа $Y_{ts}(s)$ відстає від переміщення золотника $X_{zol}(s)$ на кут $\phi_1(\omega)$, тоді

$$Y_{ts}(j\omega) = Y_{ts}(\omega) e^{j(\omega t + \phi_1(\omega))}. \quad (12)$$

Реакція ґрунту $R_y(s)$ відстає від деформації його $Y_{ts}(s)$ на кут $\phi_2(\omega)$

$$R_y(j\omega) = R_y(\omega) e^{j(\omega t + \phi_1(\omega) + \phi_2(\omega))}. \quad (13)$$

З урахуванням рівнянь (9) і (10) реакція ґрунту має вигляд:

$$R_y(j\omega) = -\frac{Y_{ts}(\omega)e^{j(\omega t + \phi_1(\omega))} \left(1 - a_2\omega^2 + j\omega(a_1 - a_3\omega^2)\right)}{b_{01} + j\omega b_{11}} + X_{zol}e^{j\omega t} \frac{b_{02} + j\omega b_{12}}{b_{01} + j\omega b_{11}}. \quad (14)$$

Крім того, реакція зразка ґрунту визначається через функції, які залежать від кругової частоти гармонійних коливань ω та характеризують жорсткість $K_y(\omega)$ і демпфування $B_y(\omega)$ зразка ґрунту [1, 2]

$$R_y(j\omega) = \left(K_y(\omega) + j\omega B_y(\omega)\right) Y_{ts}(\omega) e^{j(\omega t + \phi_1(\omega))}. \quad (15)$$

Порівнявши два останні вирази, знаходимо функції $K_y(\omega)$ і $B_y(\omega)$:

$$K_y(\omega) = K_{y1}(\omega) + K_{y2}(\omega); \quad (16)$$

$$B_y(\omega) = B_{y1}(\omega) + B_{y2}(\omega), \quad (17)$$

де
$$K_{y1}(\omega) = (c - c_g) \left(\omega^2 T_m^2 + \frac{-1 + T_g^2 \omega^2}{1 + T_g^2 \omega^2} \right) + \frac{\omega^2 B}{1 + T_g^2 \omega^2}; \quad (18)$$

$$K_{y2}(\omega) = K_{px} F_{ts} \frac{1 + T_g T_{zol} \omega^2}{1 + T_g^2 \omega^2} \frac{1}{\cos \phi_1(\omega)} \frac{X_{zol}(\omega)}{Y_{ts}(\omega)}; \quad (19)$$

$$B_{y1}(\omega) = \frac{B}{1 + T_g^2 \omega^2} + 2\xi T_m (c - c_g); \quad (20)$$

$$B_{y2}(\omega) = K_{px} F_{ts} \frac{T_{zol} - T_g}{1 + T_g^2 \omega^2} \frac{1}{\cos \phi_1(\omega)} \frac{X_{zol}(\omega)}{Y_{ts}(\omega)}. \quad (21)$$

Аналіз виразів (18)—(21) показує, що динамічні характеристики зразка ґрунту, які визначаються, залежать від параметрів установки, на якій проводяться випробування. Найбільший вплив на функції $K_{y1}(\omega)$ та $B_{y1}(\omega)$ мають параметри установки: c_g , T_m , T_g , B . Доданок $B_{y1}(\omega)$ також залежить від коефіцієнта ξ . Складові $K_{y2}(\omega)$ та $B_{y2}(\omega)$ пропорційні K_{px} , F_{ts} , відношенню амплітуд ходу золотника $X_{zol}(\omega)$ і переміщення штампа $Y_{ts}(s)$ та зворотно пропорційні косинусу кута $\phi_1(\omega)$ між ними, а також залежать від сталих часу T_g та T_{zol} . Якщо $T_{zol} = T_g$ доданок $B_{y2}(\omega) = 0$, а $K_{y2}(\omega)$ не залежить від параметрів T_g та T_{zol} .

Для визначення фазового зсуву $\phi_2(\omega)$ між амплітудними значеннями переміщення штампа $Y_{ts}(\omega)$ та реакцією зразка ґрунту $R_y(\omega)$ знайдемо частотну передавальну функцію гідроприводу установки за реакцією ґрунту

$$W_{RX}(j\omega) = \frac{Y_{ts}(j\omega)}{R_y(j\omega)} = W_R(j\omega) + \frac{X_{zol}(j\omega)}{R_y(j\omega)} W_{Xzol}(j\omega). \quad (22)$$

Рівняння (22) з урахуванням виразів (9) та (10) має вигляд:

$$W_{RX}(j\omega) = \frac{(b_{02}K_{RX}(\omega) - b_{01}) + (K_{RX}(\omega)b_{12} - b_{11})j\omega}{1 - a_2\omega^2 + j(a_1 - a_3\omega^2)}, \quad (23)$$

де
$$K_{RX}(\omega) = \frac{X_{zol}(\omega)}{R_y(\omega) \cos(\phi_1(\omega) + \phi_2(\omega))}. \quad (24)$$

Тоді величина фазового зсуву $\phi_2(\omega)$ дорівнює

$$\phi_2(\omega) = \phi_{21}(\omega) + \phi_{22}(\omega), \quad (25)$$

$$\text{де } \varphi_{21}(\omega) = -\arctg \frac{\left(\frac{B}{c - c_g} + 2\xi T_m + T_g (1 - T_m^2) \right) \omega}{1 - (T_m^2 + 2\xi T_m T_g) \omega^2}; \quad (26)$$

$$\varphi_{22}(\omega) = \arctg \frac{(K_{px} F_{ts} K_{RX}(\omega) - T_g) \omega}{K_{px} F_{ts} K_{RX}(\omega) - 1}. \quad (27)$$

Таким чином, доданок $\varphi_{21}(\omega)$ залежить від параметрів установки: B , T_g , c_g , T_m , ξ . Доданок $\varphi_{22}(\omega)$ залежить від T_g , K_{px} , F_{ts} та $K_{RX}(\omega)$.

Аналіз виразів (16)—(21) та (25)—(27) показує, що динамічні характеристики випробуваного зразка ґрунту, які визначаються за методом передавальної функції, складаються з двох доданків. Доданки $K_{y1}(\omega)$, $B_{y1}(\omega)$ та $\varphi_{21}(\omega)$ залежать тільки від параметрів гідроприводу стабілометра та частоти вимушених коливань ω . Доданки $K_{y2}(\omega)$, $B_{y2}(\omega)$ та $\varphi_{22}(\omega)$ залежать як від параметрів стабілометра, частоти вимушених коливань ω , так й від амплітудних значень результатів натурального експерименту: $Y_{ts}(\omega)$, $\phi_1(\omega)$, $\phi_2(\omega)$ та $R_y(\omega)$. Отже, зменшення доданків $K_{y1}(\omega)$, $B_{y1}(\omega)$ та $\varphi_{21}(\omega)$ дозволяє зменшити вплив параметрів гідроприводу стабілометра на результати випробувань зразка ґрунту. Отримані рівняння дозволяють відокремити безпосередньо динамічні характеристики самого зразка ґрунту від впливу динамічних характеристик установки, на якій проводяться випробування, та виявити шляхи зменшення величини цього впливу для підвищення точності випробувань.

Висновки

Розроблено математичну модель роботи гідроприводу стабілометра при циклічному навантаженні зразка ґрунту. Отримано математичні вирази для визначення динамічних характеристик ґрунту. Виявлено характер впливу робочих параметрів гідроприводу стабілометра на значення виміряних динамічних характеристик ґрунту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Динамический расчет зданий и сооружений: [справочник проектировщика] / Под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. [2-е изд. перераб. и доп.] — М.: Стройиздат, 1984. — 303 с.
2. Шве́ц В. Б. Справочник по механике и динамике грунтов / [В. Б. Шве́ц, Л. К. Гинзбург, В. М. Гольдштейн и др.]; под ред. В. Б. Шве́ца. — К.: Будівельник, 1987. — 232 с.
3. Режим доступу: http://www.игэран_лаборатория_анализа_геологического_риска.htm
4. Ратушняк Г. С. Гідропривод стабілометра з корекцією його динамічних властивостей / Г. С. Ратушняк, О. Б. Волошин // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. — Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2007. — № 4. — С. 98—109.
5. Фундаменты машин с динамическими нагрузками: СНиП 2.02.05-87. — М.: Стройиздат, 1988. — 45 с.
6. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем: [учеб. для вузов] / Д. Н. Попов. [2-е изд., перераб. и доп.] — М.: Машиностроение, 1987. — 464 с.
7. Крутов В. И. Основы теории автоматического регулирования: [учеб. для машиностроительных спец. вузов] / В. И. Крутов, Ф. М. Данилов, П. К. Кузьмик и др.; под ред. В. И. Крутова. [2-е изд., перераб. и доп.] — М.: Машиностроение, 1984. — 368 с.

Рекомендована кафедрою теплогазопостачання

Надійшла до редакції 08.05.08
Рекомендована до друку 16.06.08

Георгій Сергійович Ратушняк — завідувач кафедри, **Олександр Борисович Волошин** — старший викладач.

Кафедра теплогазопостачання, Вінницький національний технічний університет