

## СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ

Статичні характеристики процесу ущільнення є основою для визначення параметрів автоматичного управління (передаючої функції, часу післядії, часу запізнення і т. ін.). Вони можуть бути побудовані шляхом аналізу процесу ущільнення. Як відомо [1], цей процес здійснюється шляхом циклічного навантаження бетонної суміші робочим органом вібраційної машини. При цьому за кожен цикл навантаження в суміші виникають напруження і, як наслідок, деформації. Накопичення залишкових деформацій веде до зміни густини суміші і її ущільнення.

Процес ущільнення не сталий за кожен цикл навантаження. Параметри процесу змінюються в часі навантаження і просторі (тобто по габаритах виробу).

Дослідження перехідних процесів обумовлений необхідністю побудови статичних характеристик і виробу на їх основі датчиків відповідно до параметрів процесу.

Уявімо собі циліндричну ємність, заповнену нелінійно-пружним середовищем (бетонна суміш, Рис. 1). Припустимо, що виникла плоска ударна хвиля, яка поширюється в матеріалі з постійною швидкістю  $C$ . В області позаду її фронту швидкість частин, тиск та густина припускаються постійними.

Мається перехідна зона між фронтом ударної хвилі та незбуреним матеріалом. Умови у перехідній зоні також припускаються установленими. Нехай тиск, густина та швидкість часток бетону позаду перехідної зони, у зоні А суть  $\sigma_x$ ,  $\rho_1$ ,  $V$ , а у необхідному матеріалі відповідні величини  $\sigma_0$ ,  $\rho_0$ ,  $V_0=0$ . Так як речовина ніде не акумулюється, то справедливе рівняння збереження маси:

$$C \rho_0 = (C - V) \rho_1 \quad (1)$$

де  $C \rho_0$  - маса матеріалу за одиницю часу у незбуреному матеріалі;  $(C - V) \rho_1$  - маса матеріалу за одиницю часу у збуреному матеріалі.

Матеріал входить у перехідну зону зі швидкістю  $V_0$  та покидає її зі швидкістю  $V$ . Прирівнюючи швидкість зміни кількості руху діючій силі, маємо

$$m \cdot (V - V_0) = \sigma_x - \sigma_0 \quad (2)$$

$$C \rho_0 \cdot V = \sigma_x - \sigma_0 \quad (3)$$

Ці співвідношення визначають значення тиску на фронті хвилі, деформацію частин бетонної суміші, а відповідно, і діаграму напруг  $\sigma_x = f(\epsilon)$ . Такі діаграми побудовані нами (Рис.2) для бетону, складу 1:2, В/Ц=0,33, при трьох режимах ущільнення:

$$A_0 = 0.05 \text{ см, } n = 3000 \text{ кол/хв}$$

$$A_0 = 0.05 \text{ см, } n = 6000 \text{ кол/хв}$$

$$A_0 = 0.05 \text{ см, } n = 9000 \text{ кол/хв}$$

Відповідно швидкість ущільнення  $V = 15,7 \text{ см/сек; } 31,4 \text{ см/сек; } 47,1 \text{ см/сек}$

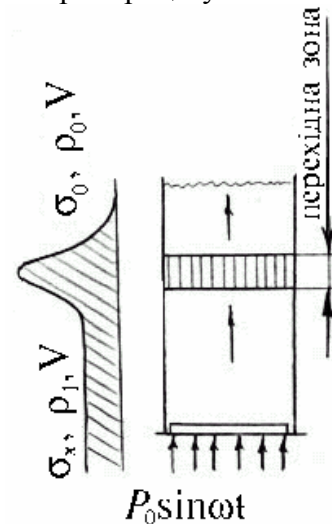


Рис. 1. Схема розповсюдження ударної хвилі

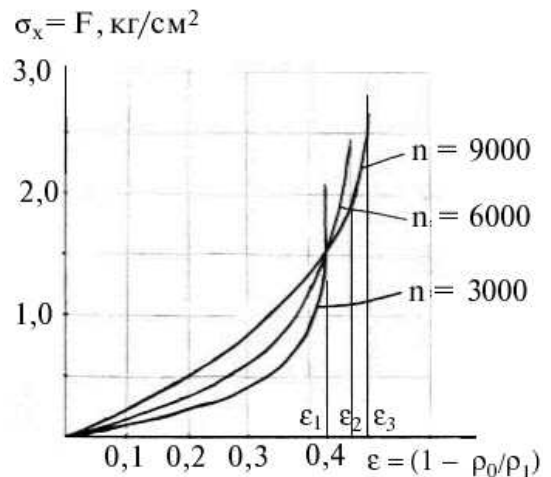


Рис.2. Діаграма навантаження бетонної суміші

Як бачимо з рисунка, вібратори з різними характеристиками ущільнюють бетон до визначеної густини ( $E_1, E_2, E_3$ ) (експоненціальні криві). Подальше ущільнення можливе тільки вібратором, у якого швидкість коливань  $V = A \cdot \omega$  буде більшою. Це дає основу стверджувати, що критерієм вибору режиму формування являється швидкість коливань вібратора. Підвищуючи амплітуду або частоту ми підвищуємо ефективність вібрації.

Коливання, які супроводжують динамічне навантаження, як відомо, носять резонансний характер, тобто володіють властивостями підсилюватись, якщо вони здійснюються при частоті власних коливань виробів. При резонансній частоті коливань переміщення значно більше, ніж при частотах, далеких від резонансу. Таким чином, оптимальний режим віброущільнення бетонних сумішей буде відповідати частоті власних коливань виробу при максимальній швидкості, вибраній за рахунок амплітуди вимушених коливань. Практично ми повинні досягнути того щоб  $\sigma_x = F = c \cdot \rho_0 \cdot A \cdot \omega$  було максимальним (статичною напругою у бетоні  $\sigma$ , для виробу невеликої висоти можливо знехтувати). При управлінні регулюючими величинами будуть  $A$  і  $\omega$  вібратора.

На Рис.3 на основі дослідів В. Л. Саковича приведені графіки зміни амплітуди та потужності по мірі ущільнення. А на Рис.4 залежність сили опору від швидкості коливань. Тут амплітуда  $A = A_0 \cdot \lambda_0 \cdot \cos(\alpha)$

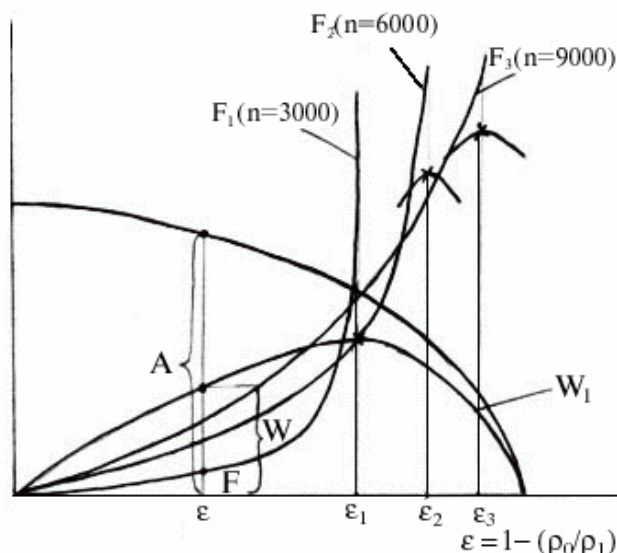


Рис.3. Залежність амплітуди та потужності ущільнення від густини

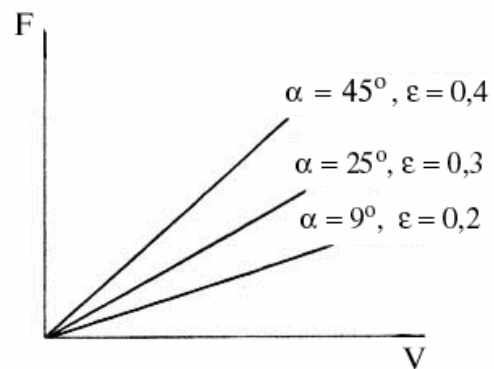


Рис.4. Залежність сили опору коливань швидкості руху вібратора

Потужність ущільнення  $W = A \cdot F \cdot \omega$ . Кут зсуву фаз  $\sin(\alpha) = F/Q_0$ . Збурююча сила вібратора  $Q_0, Q_1, Q_2, Q_3$  (вибрана з умови, щоб вібратор робив на максимальну потужність при відповідному максимальному ущільненні), тобто  $Q_0 = F/\sin(45^\circ)$ . При збільшенні частоти коливань у 2 рази, потужність ущільнення збільшиться у 4 рази. Рис.4 дає пряму пропорційність силі опору від швидкості коливань (гіпотеза в'язкого опору Кельвіна-Фойгта). При складанні диференційного рівняння поведінки вібраційної машини для ущільнення бетону, потрібно розглядати 2 випадки:

1. випадок невстановлених коливань у процесі віброущільнення;
2. випадок встановлених коливань, коли віброущільнення вже відбулося.

В залежності від цього повинна встановитись відповідна мета: у першому випадку визначення параметрів механічної системи, які забезпечують отримання заданого технологіями амплітудно-частотного раціонального, з точки зору ущільнення бетону, режиму коливань робочого органа і, заданого режиму ущільнення; у другому випадку – визначення параметрів механічної системи для досягнення більш якісного ущільнення.

Іншими словами, механіки повинні забезпечити режим ущільнення, заданий технологіями, що залучає до цього вібраційні механізми із нелінійними зв'язками, віброударні і т. інше, якщо вони найбільш повно відповідають вимогам технології.

У першому випадку затухання пружних зв'язків вибирається пропорційним амплітуді коливань, при чому коефіцієнт затухання пружних зв'язків буде змінним, і залежатиме від  $t$  (або  $\epsilon$ ):

$$mx + kx + c(t)(x + \Phi(x)) = P_0 \sin(\omega \cdot t) \quad (4)$$

де  $c(t) = \partial F / \partial X_{x=L}$  – коефіцієнт затухання пружних зв'язків;  $kx + c(t)x$  – пружна сила відновлення;  $\Phi(x)$  – внутрішній не пружний опір;  $m$  – коливальна маса;  $k$  – коефіцієнт жорсткості пружин.

Коливальна маса береться з рахунком коливального бетону  $m$ , маса якого змінюється по мірі ущільнення і визначається за формулою

$$m_\mu = c \cdot t \cdot \rho,$$

де  $t$  – час дії імпульсу.

У випадку, якщо товщина виробу більше  $\lambda = c \cdot t$ , коливальну систему треба розглядати як двохмасову, не дивлячись на безперервний рух бетону. В другому випадку

$$m \cdot x + k \cdot x + f(x) \cdot x = P_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5)$$

де  $f(x)$  – коефіцієнт затухання пружних зв'язків  $f(x) = \partial F(\epsilon)_{\epsilon=\epsilon_0} / \partial X_{x=L}$

Оскільки коефіцієнт затухання пружних зв'язків  $c(t)$  змінюється по мірі ущільнення для забезпечення даного режиму коливань необхідно мати робочий орган із змінними у часі параметрами. Ця задача не може бути розв'язана технічно. Аналізуючи рівняння (4), можна вибрати параметри, які необхідно змінити для досягнення заданого режиму. При аналізі будемо виходити із сили опору коливань.

Сила опору коливань вібратора може бути вибрана основною статичною характеристикою автоматизацією процесу віброущільнення бетонних сумішей, по якій можливо побудувати керування.

Задачею автоматичного керування цього процесу являється забезпечення механічного режиму коливань вібраційної машини з метою отримання максимальної щільності бетону  $F(\epsilon) = \rho_0 \cdot c \cdot A \cdot \omega$ .

В якості регулюючих величин тут можуть бути густина  $\rho$  (або відносна деформація  $\epsilon$ ), амплітуда коливань машини  $n$ , потужність коливань машини  $W$ .

В якості збурюючих величин можуть бути амплітуда коливань вібратора  $A$ , частота  $n$  або їх лінійна комбінація. У зв'язку з цим можливо розглянути 5 випадків управління :

1. Управління машиною з визначеними механічними параметрами, не змінними у часі.

Тут керування може вироблятися по амплітуді, частоті, потужності (Рис.5).

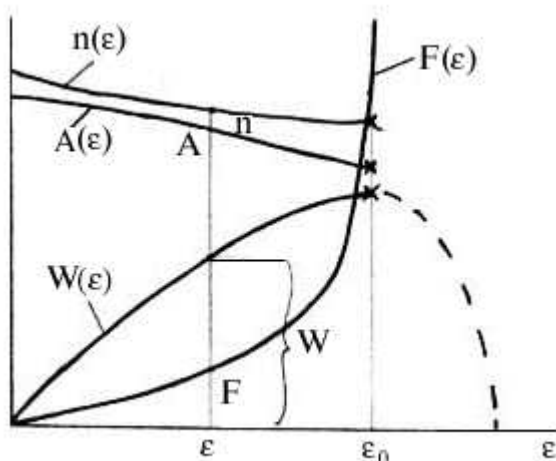


Рис.5. Керування працею машини за якістю ущільнення (густиною).

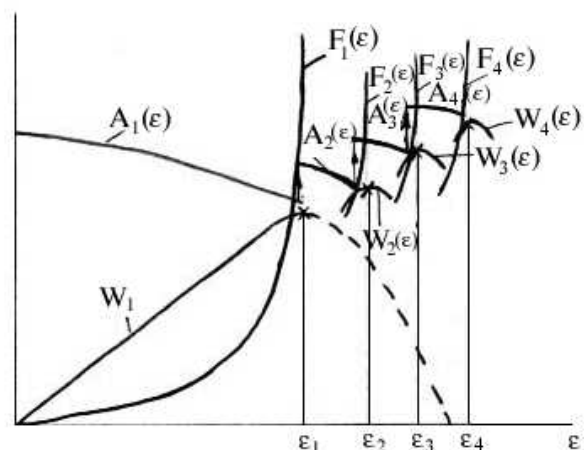


Рис.6. Керування машиною за амплітудою коливань.

Задачею такого управління являється відключення двигуна машини по досягненню максимально можливого (або заданої) при даному режимі ущільнення густини. В якості керованих величин в цьому випадку можуть бути  $A$ ,  $n$ ,  $W$ ,  $\epsilon$ .

2. Керування машиною із змінними по мірі ущільнення амплітуди (Рис.6) Задачею такого керування являється – по досягненню максимально можливого при даному режимі ущільнення густини переключення двигуна машини на більшу амплітуду (регулятор амплітуд). Амплітуда в цьому випадку являється регулюючою величиною. Керування можливе по  $A$  та  $W$  (датчик амплітуди, потужності),  $\varepsilon$  - густина.
3. Керування машиною із змінною по мірі ущільнення частотою коливань (Рис.7).

Задачею такого управління являється – по досягненню максимально можливого при даному режимі ущільнення густини переключення двигуна машини на більшу частоту (регулятор частоти – двигун постійного струму). Регулюючою величиною в цьому випадку є частота. Управління можливе по  $W$  та  $\varepsilon$ .

4. Управління машиною із змінною по мірі ущільнення потужністю (лінійна комбінація амплітуди і частоти, Рис.8) По досягненню максимально можливої при даному режимі ущільнення густини переключастся двигун на роботу в іншому режимі. Регулюючою величиною в цьому випадку являється потужність. Управління можливе по  $A$ ,  $\varepsilon$ .

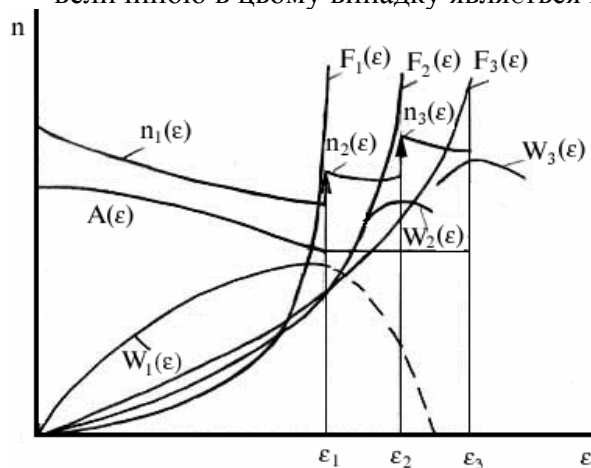


Рис.7. Керування машиною за частотою коливань

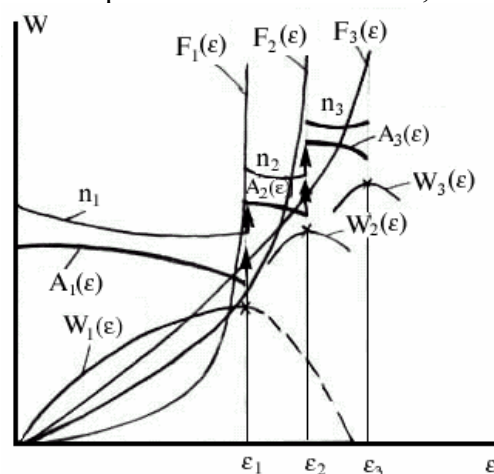


Рис.8. Керування машиною за потужністю

5. Підтримання роботи установки в резонансному режимі (Рис.9). Цей випадок являється найбільш цікавим з точки зору управління, так як він найбільш ефективний з точки зору витрат електроенергії і найбільш повно відповідає вимогам технології. Частота власних коливань вібраційної машини по мірі ущільнення змінюються, так як змінюється опір коливань. Протягом ущільнення у формулі

$$\text{маса, } W = \sqrt{\frac{C}{M + M}}, \text{ тобто частота власних}$$

коливань зменшується при ущільненні. В зв'язку з цим, якщо в момент включення система знаходиться в положенні з параметрами  $A_0$ ,  $(\omega/\omega_0)$ , тобто через деякий час система виявиться у положенні з параметрами  $A_1$ ,  $(\omega/\omega_0)_1$ .

Щоб змінити положення системи, ввести її в зону резонансу, необхідно змінити співвідношення

$\omega/\omega_0$  - зменшити його. Це можливо або зменшивши частоту вимушених коливань, або збільшивши частоту власних коливань. З точки зору ущільнення бетону зменшити частоти вимушених коливань небажано. Залишається збільшити частоту власних коливань. Це можливо єдиний засіб – збільшуючи жорсткість пружин можна збільшити частоту вимушених коливань таким чином, щоб співвідношення  $\omega/\omega_0 = 1$ .

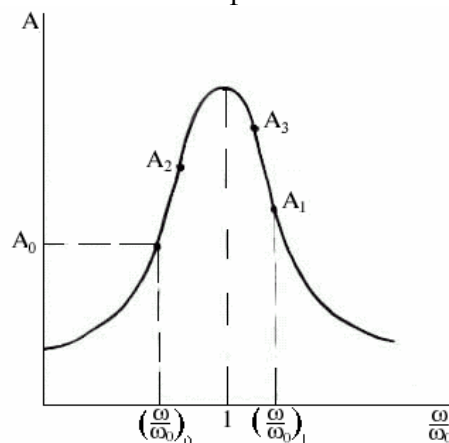


Рис.9. Управління машиною в резонансному режимі

На Рис.10 приведена побудова кривих управління вимушеної частоти коливань та жорсткість пружин по мірі ущільнення. Приведені статичні характеристики повинні бути побудовані в кожному конкретному випадку у відповідності з режимом ущільнення та реологічними характеристиками ущільнення бетонних сумішей. Для наочності на рисунку показано, у випадку застосування більш жорстких сумішей, або сумішей на більш крупному заповнювачі,  $C(\varepsilon)$ ,  $\omega(\varepsilon)$  змістяться у низ.

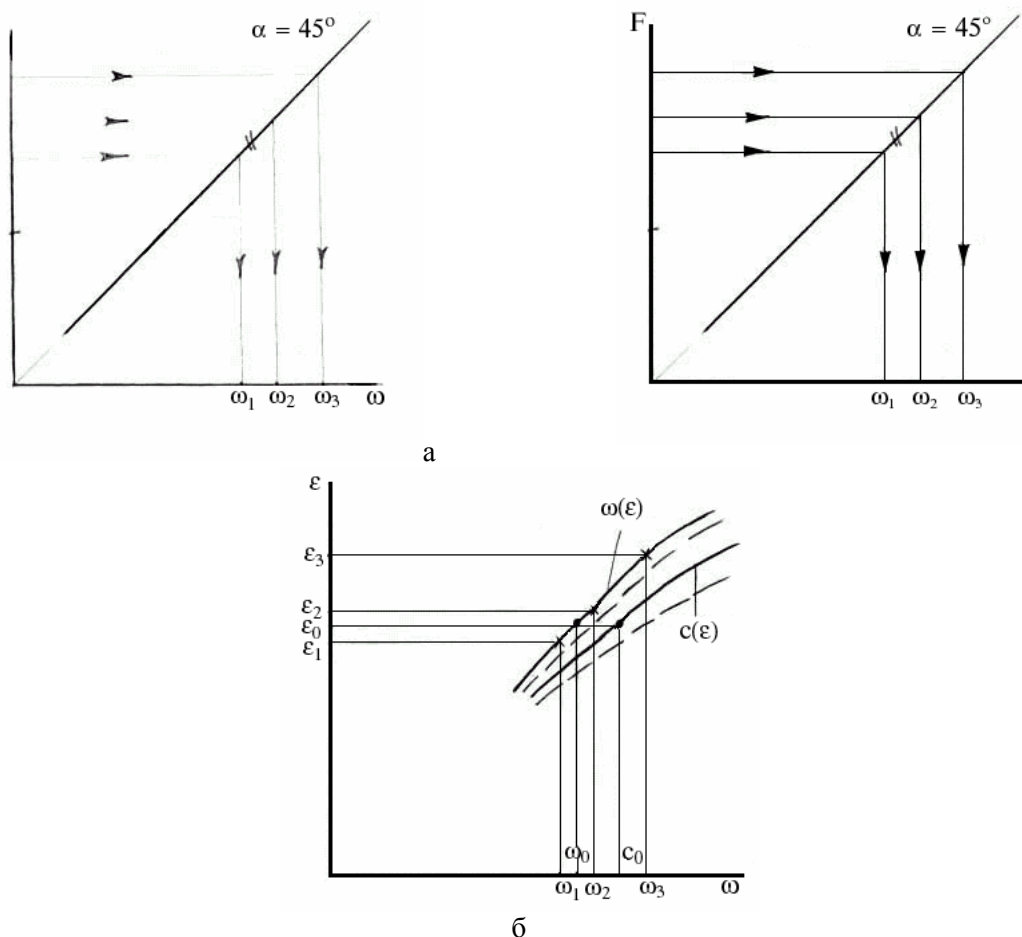


Рис. 10. Параметри управління:

а - частота від опору; б - відносної деформації

Висновки: представлені методики побудови статичних характеристик автоматичного керування процесу ущільнення бетонних сумішей. Подальшою задачею спеціалістів в цій області являється розробка електричних схем, методів і регуляторів управління процесів віброущільнення.

### Література

1. Сивко В.И. Основы механики строительных материалов. – К.: Выща шк., 1987. – 168с.