

## АЛГОРИТМ КОРЕКЦІЇ ФОРМУВАННЯ СИЛОВОЇ ДІЇ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ВІБРАЦІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ

*І.Д. Пузько,*

*Сумський державний університет, м. Суми*

*У роботі розглянуто співвідношення для визначення пондеромоторної сили. Урахована інерційність контурів обмоток збудження і підмагнічування за наявності негативного зворотного зв'язку за швидкістю. Отримані нові аналітичні співвідношення для визначення величини зміни напруги обмотки підмагнічування залежно від величини зміни напруги обмотки збудження. Наведений новий алгоритм способу корекції силової дії при проведенні вібраційних випробувань.*

**Ключові слова:** *вібраційні випробування, формування силової дії, корекція, інерційність контурів обмоток, збудження і підмагнічування.*

*В работе рассмотрено соотношение для определения пондеромоторной силы. Учтена инерционность контуров обмоток возбуждения и подмагничивания при наличии отрицательной обратной связи по скорости. Получены новые аналитические соотношения для определения величины изменения напряжения обмотки подмагничивания в зависимости от величины изменения напряжения обмотки возбуждения. Приведен новый алгоритм способа коррекции силового воздействия при проведении вибрационных испытаний.*

**Ключевые слова:** *вибрационные испытания, формирование силового воздействия, коррекция, инерционность контуров обмоток, возбуждение и подмагничивание.*

### ВСТУП

При проведенні випробувань об'єктів машинобудівної техніки компресорного, транспортного, авіаційного, енергетичного призначення на віброміцність, вібронадійність, вібростійкість, при реалізації вібраційних режимів технологічного призначення знаходять застосування електродинамічні вібратори [1- 4].

При проведенні вібраційних випробувань об'єктів застосовується метод сканування частоти сигналу збуджувальної дії, який дозволяє визначати резонансні частоти випробуваної конструкції і величини амплітуд на резонансних частотах. Таким способом виявляють, яка із власних частот випробуваної конструкції найбільш небезпечна при функціонуванні в реальних умовах експлуатації [2].

Вібровипробування методом сканування частоти сигналу збуджувальної дії проводяться при застосуванні замкнутої системи керування в режимах стабілізації рівня прискорення, швидкості або переміщення рухомої платформи вібратора. На низьких частотах вібровипробування, як правило, проводяться при постійному рівні переміщення, на більш високих частотах стабілізують рівень прискорення.

При проведенні вібраційних випробувань об'єктів, маса яких перевищує масу рухомої системи вібратора, для забезпечення постійної силової дії на випробуваний об'єкт проводять корекцію системи керування вібратором.

Відомий алгоритм введення корекції будується на такій зміні індукції підмагнічування, величина якої є зворотною щодо величини зміни струму котушки збудження вібратора.

Однак точність такого алгоритму недостатня, що пояснюється неврахуванням математичних моделей при формуваннях струмів в

обмотках збудження і підмагнічування, перехідні процеси в яких характеризуються різною інерційністю.

У роботі [5] застосовані математичні моделі замкнених контурів обмоток збудження і підмагнічування, причому застосована математична модель процесів у контурі обмотки збудження, що враховує наявність негативного зворотного зв'язку за швидкістю переміщення рухомої системи вібратора, а застосована математична модель процесів у контурі обмотки підмагнічування не враховує наявність негативного зворотного зв'язку за швидкістю переміщення рухомої системи вібратора. Такий алгоритм реалізації способу проведення вібраційних випробувань не забезпечує достатню точність формування постійної силової дії на випробуваний об'єкт, маса якого перевищує масу рухомої системи вібратора електродинамічного типу.

У нашій роботі врахована наявність зворотного зв'язку за швидкістю в контурі обмотки підмагнічування.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналогічно роботі [5] застосовуємо співвідношення для визначення пондеромоторної сили  $F$ :

$$F = Bl_k I_k, \quad (1)$$

де  $B$  - індукція в повітряному зазорі магнітопроводу;  $l_k$  - довжина проводу обмотки котушки збудження;  $I_k$  - струм котушки збудження.

У режимі сканування частоти змінюється струм  $I_k$  збудження, що призводить до зміни величини пондеромоторної сили  $F$ . При зміні  $I_k$  від величини  $I_{k1}$  до величини  $F_1 = B_1 l_k I_{k1}$  величина сили  $F$  змінюється від величини  $F_1$  до величини  $F_2 = F_1 \pm F$ .

Для стабілізації величини силової дії  $F = const$  необхідно забезпечити рівняння

$$F_1 = F_2$$

або

$$F_1 = B_1 l_k I_{k1} = F_2 = B_2 l_k I_{k2} = (B_1 \pm B) l_k (I_{k1} \mp I_k). \quad (2)$$

Після нескладних перетворень із (2) отримуємо таке співвідношення

$$\frac{I_{k1}}{\Delta I_k} - \frac{B_1}{\Delta B} = \mp 1. \quad (3)$$

При формуванні (2) у вигляді

$$B_1 I_{k1} = (B_1 \pm B) (I_{k1} \mp I_k) \quad (4)$$

співвідношення (3) набуває вигляду

$$\frac{I_{k1}}{\Delta I_k} - \frac{B_1}{\Delta B} = \pm 1. \quad (5)$$

Електричні процеси в замкненому колі обмотки рухомої котушки збудження при урахуванні негативного зворотного зв'язку за швидкістю рухомої системи вібратора моделюються диференціальним рівнянням першого порядку, що в операційній формі має вигляд

$$(pL_k + r_k) I_k(p) = U_k(p) - Bl_k p X(p), \quad (6)$$

де  $L_k, r_k$  – індуктивність і опір проводу обмотки довжиною  $l_k$  котушки збудження;  $B$  – операційне зображення магнітної індукції в повітряному зазорі магнітопроводу, що формується при надходженні струму  $I_k(p)$  в операційній формі в обмотку підмагнічування вібратора;  $U_k(p)$  – операційне зображення напруги, що застосовується для живлення струмом  $I_k(p)$  обмотки збудження;  $X(p)$  – операційне зображення переміщення рухомої платформи вібратора;  $U_k(p)=d/dt$  – оператор диференціювання.

Електричні процеси в замкненому колі обмотки котушки підмагнічування для створення магнітної індукції в повітряному зазорі магнітопроводу вібратора при урахуванні негативного зворотного зв'язку, величина якого пропорційна швидкості переміщення рухомої системи вібратора, моделюються диференціальним рівнянням першого порядку, яке в операційній формі має вигляд

$$(pL_n+r_n)I_n(p)=U_n(p) - B_n(p)l_n pX(p), \quad (7)$$

де  $L_n$  – індуктивність обмотки котушки підмагнічування;  $r_n$  – опір проводу обмотки котушки підмагнічування;  $l_n$  – довжина проводу обмотки котушки підмагнічування;  $U_n(p)$  – операційне зображення напруги, що застосовується для живлення струмом  $I_n(p)$  – обмотки підмагнічування.

Для отримання аналітичних співвідношень застосовуємо також закон Ома для магнітного кола, яке в операційній формі має вигляд

$$I_n(p)W_n = B(p)S_\delta G^{-1}, \quad (8)$$

де  $W_n$  – число витків обмотки підмагнічування;  $G$  – магнітна провідність повітряного зазору, де розташована обмотка котушки збудження;  $S$  – площа поперечного перерізу повітряного зазору, що перетинається магнітними силовими лініями магнітного потоку обмотки підмагнічування.

Із (8) отримуємо співвідношення

$$I_n(p) = \frac{B(p)}{K_n}, \quad K_n = \frac{W_n G}{S_\delta}. \quad (9)$$

Із (7), (8) отримуємо таке співвідношення для визначення струму  $I_n(p)$  обмотки підмагнічування в операційній формі

$$I_n(p) = \frac{U_n(p)}{(pL_n + r_n) \left[ 1 + \frac{K_n l_n p X(p)}{(pL_n + r_n)} \right]}. \quad (10)$$

На підставі (6),(7),(8),(9),(10) отримуємо такі співвідношення для визначення струму  $I_k(p)$  обмотки збудження і індукції  $B(p)$  в операційній формі

$$I_k(p) = \frac{U_k(p)}{(pL_k + r_k)} - \frac{K_n l_k U_n(p) p X(p)}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left[ 1 + \frac{K_n l_n p X(p)}{(pL_n + r_n)} \right]}; \quad (11)$$

$$B(p) = K_n I_n(p) = \frac{K_n U_n(p)}{(pL_n + r_n) \left[ 1 + \frac{K_n l_n pX(p)}{(pL_n + r_n)} \right]}. \quad (12)$$

На підставі (5),(11),(12) отримуємо такі вирази:

$$B_2(p) = B_2(p) \pm \Delta B = \frac{K_n [U_n(p) \pm \Delta_n U(p)]}{(pL_n + r_n) \left[ 1 + \frac{K_n l_n pX(p)}{(pL_n + r_n)} \right]}, \quad (13)$$

$$I_{k2}(p) = I_{k1}(p) \pm \Delta_k I = \frac{U_{k1}(p) \mp \Delta_k U(p)}{(pL_k + r_k)} - \frac{K_n l_k pX(p) [U_{n1}(p) \pm \Delta_n U(p)]}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left[ 1 + \frac{K_n l_n pX(p)}{(pL_n + r_n)} \right]}, \quad (14)$$

$$\pm \Delta B(p) = \pm \frac{K_n \Delta_n U(p)}{(pL_n + r_n) \left[ 1 + \frac{K_n l_n pX(p)}{(pL_n + r_n)} \right]}, \quad (15)$$

$$\mp \Delta_k I(p) = \mp \left\{ \frac{\Delta_k U(p)}{(pL_k + r_k)} + \frac{K_n l_k pX(p) \Delta_n U(p)}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left[ 1 + \frac{K_n l_n pX(p)}{(pL_n + r_n)} \right]} \right\}. \quad (16)$$

Беручи до уваги (5),(11),(12),(15),(16), отримаємо таке співвідношення:

$$\frac{\frac{U_{k1}(p)}{(pL_k + r_k)} - \frac{K_n l_k pX(p) U_{n1}(p)}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left[ 1 + \frac{K_n l_n pX(p)}{(pL_n + r_n)} \right]}}{\frac{\Delta_k U(p)}{(pL_k + r_k)} + \frac{K_n l_k pX(p) \Delta_n U(p)}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left[ 1 + \frac{K_n l_n pX(p)}{(pL_n + r_n)} \right]}} - \frac{\frac{K_n U_{n1}(p)}{(pL_n + r_n) \left[ 1 + \frac{K_n l_n pX(p)}{(pL_n + r_n)} \right]}}{K_n \Delta_n U(p)} = \pm 1. \quad (17)$$

Після нескладних перетворень (17) отримуємо алгебраїчне рівняння для визначення  ${}_n U(p)$ :

$$\begin{aligned} \pm \Delta_n^2 U(p) + \Delta_n U(p) \frac{l_n}{l_k} \left[ \frac{(pL_n + r_n)}{K_n l_n pX(p)} + 1 \right] [U_{k1}(p) \mp \Delta_k U(p)] - \\ - U_{n1}(p) \Delta_k U(p) \frac{l_n}{l_k} \left[ \frac{(pL_n + r_n)}{K_n l_n pX(p)} + 1 \right] = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Визначимо  ${}_nU(p)$  як розв'язок квадратного рівняння (18)

$$\Delta_n U_{1,2}(p) = -\frac{1}{2} \frac{l_n}{l_k} \left[ 1 + \frac{(pL_n + r_n)}{K_n l_n pX(p)} \right] [U_{k1}(p) \mp \Delta_k U(p)] \pm \left\{ \frac{1}{4} \frac{l_n^2}{l_k^2} \left[ 1 + \frac{(pL_n + r_n)}{K_n l_n pX(p)} \right]^2 [U_{k1}(p) \mp \Delta_k U(p)]^2 + \frac{U_{n1}(p) \Delta_k U(p) l_n}{l_k} \left[ 1 + \frac{(pL_n + r_n)}{K_n l_n pX(p)} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (19)$$

Проведемо нескладні перетворення (19) і отримаємо таке співвідношення для визначення  ${}_nU(p)$

$$\Delta_n U_{1,2}(p) = \frac{1}{2} \frac{l_n}{l_k} \left[ 1 + \frac{(pL_n + r_n)}{K_n l_n pX(p)} \right] [U_{k1}(p) - \Delta_k U(p)] \times \left\{ -1 \pm \sqrt{1 + \frac{U_{n1}(p) \Delta_k U(p)}{\frac{1}{4} \frac{l_n}{l_k} \left[ 1 + \frac{(pL_n + r_n)}{K_n l_n pX(p)} \right] [U_{k1}(p) - \Delta_k U(p)]^2}} \right\}. \quad (20)$$

При виконанні умови

$$\frac{4U_{n1}(p) \Delta_k U(p)}{\frac{l_n}{l_k} \left[ 1 + \frac{(pL_n + r_n)}{K_n l_n pX(p)} \right] [U_{k1}(p) - \Delta_k U(p)]^2} \ll 1 \quad (21)$$

із (20) отримаємо наближене співвідношення для визначення  ${}_nU_{1,2}(p)$

$$\Delta_n U_{1,2}(p) = \frac{1}{2} \frac{l_n}{l_k} \left[ 1 + \frac{(pL_n + r_n)}{K_n l_n pX(p)} \right] [U_{k1}(p) - \Delta_k U(p)] \times \left\{ -1 \pm \left[ 1 + \frac{2U_{n1}(p) \Delta_k U(p)}{\frac{l_n}{l_k} \left[ 1 + \frac{(pL_n + r_n)}{K_n l_n pX(p)} \right] [U_{k1}(p) - \Delta_k U(p)]^2} \right] \right\}. \quad (22)$$

При формуванні співвідношення (22) ми застосували варіант  $U_{k2}(p) = U_{k1} - \Delta_k U(p)$ . У цьому випадку для забезпечення співвідношення (3) необхідно застосувати варіант

$$U_{n2}(p) = U_{n1} + {}_nU(p),$$

а тому необхідно застосовувати тільки співвідношення для визначення  ${}_nU_1(p)$ , співвідношення для визначення  ${}_nU_2(p)$  нами не застосовується.

Таким чином, із (22) отримуємо співвідношення для визначення

$$\Delta_n U(p) = \frac{U_{n1}(p) \Delta_k U(p)}{U_{k1}(p) - \Delta_k U(p)} \quad (23)$$

або

$$\frac{U_{k1}(p)}{\Delta_k U(p)} - \frac{U_{n1}(p)}{\Delta_n U(p)} = 1. \quad (24)$$

За умови, якщо величина доданка  $\Delta_n^2 U(p)$  в рівнянні (18) являє собою величину другого порядку малості відносно інших доданків цього рівняння, із (18) отримуємо таке співвідношення  ${}_n U(p)$ :

$$\Delta_n U(p) [U_{k1} \mp \Delta_k U(p)] = U_{n1} \Delta_k U(p)$$

або

$$\frac{U_{k1}(p)}{\Delta_k U(p)} - \frac{U_{n1}(p)}{\Delta_n U(p)} = \pm 1,$$

яке дорівнює співвідношенням (23), (24), що отримані при розв'язку рівняння (18) і при виконанні умови (21).

При виконанні умови, якщо доданок  $\Delta_n^2 U(p)$  є величиною другого порядку малості відносно інших доданків рівняння (18), отримуємо таке наближене співвідношення для визначення  ${}_n U(p)$ :

$$\Delta_n U(p) = \frac{U_{n1}(p) \Delta_k U(p)}{U_{k1}(p) \mp \Delta_k U(p)}.$$

Таким чином, співвідношення (23) або (24) для визначення  ${}_n U(p)$  мають місце за умови, якщо доданок  $\Delta_n^2 U(p)$  є величиною другого порядку малості при порівнянні з іншими членами рівняння (18).

На підставі співвідношень (23), (24) формується алгоритм для реалізації способу проведення вібраційних випробувань об'єктів у випадку, якщо маса випробуваного об'єкта перевищує масу рухомої системи вібратора електродинамічного типу.

#### АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ І РЕАЛІЗАЦІЇ СПОСОБУ

Новий алгоритм визначення способу проведення вібраційних випробувань формують у результаті практичної реалізації співвідношення (23) або (24), які визначають величину дискретної зміни напруги  ${}_n U(p)$ , підмагнічування при дискретній зміні величини напруги  ${}_k U(p)$ , збудження і яка  ${}_n U(p)$  може бути визначеною на підставі таких операцій:

1) фіксують у деякий момент  $t_1$  часу початкові значення напруги  $U_{k1}(p)$  обмотки збудження і напруги  $U_{n1}(p)$  обмотки підмагнічування електродинамічного вібратора;

2) фіксують і запам'ятовують дискретний сигнал, що дорівнює величині  $\pm {}_k U(p)$  зміни напруги обмотки збудження від її початкового значення  $U_{k1}(p)$  у деякий початковий момент  $t_1$  часу до значення  $U_{k2}(p)$  в деякий момент  $t_2$  часу, а саме:  $\pm {}_k U(p) = U_{k2}(p) - U_{k1}(p)$ ;  ${}_k U(p) > 0$ , якщо  $U_{k2}(p) > U_{k1}(p)$ ;  ${}_k U(p) < 0$ , якщо  $U_{k2}(p) < U_{k1}(p)$ ;

3) формують сигнал, що дорівнює величині

$$\Delta_n U(p) = \frac{U_{n1}(p)}{(U_{k1}(p) - \Delta_k U(p))} \Delta_k U(p).$$

Новим в алгоритмі після проведення вимірювань величин напруг  $U_{k1}(p)$ ,  $U_{n1}(p)$ ,  ${}_k U(p)$  є послідовність операцій формування величини

${}_nU(p)$  зміни напруги  $U_{n1}(p)$  підмагнічування і формування зміненого значення  $U_{n2}(p)$  напруги для забезпечення постійної силової дії на об'єкт, маса якого перевищує масу рухомої системи вібратора.

Алгоритм реалізують так:

1) встановлюють випробуваний об'єкт на рухомій платформі електродинамічного вібратора;

2) вимірюють і фіксують величину  $U_{n1}(p)$  у деякий початковий момент  $t_1$  часу при підключенні обмотки підмагнічування електродинамічного вібратора до джерела напруги  $U_{n1}(p)$  підмагнічування, що формує струм  $I_{n1}(p)$  підмагнічування для формування магнітної індукції  $B_{n1}(p)$  і в той самий момент  $t_1$  часу вимірюють і фіксують величину  $U_{k1}(p)$  при підключенні обмотки збудження до джерела напруги  $U_k(p)$  збудження, що формує струм  $I_{k1}(p)$  збудження, який надходить в обмотку збудження рухомої системи вібратора;

3) вимірюють і фіксують у деякий момент  $t_2$  часу величину напруги  $U_{n2}(p) = U_{n1}(p) \pm {}_nU(p)$  підмагнічування  $U_{n2}(p)$   $U_{n1}(p)$  і величину  $U_{k2}$  напруги збудження, а також різницю напруг  ${}_kU(p) = U_{k2}(p) - U_{k1}(p)$ .

За умови, якщо величина напруги  $U_k(p)$  збудження збільшилася на величину  ${}_kU$  ( ${}_kU > 0$ ), для забезпечення постійного значення силової дії  $F_1 = F_2 = const$  необхідно змінити (зменшити) величину напруги підмагнічування на деяку величину  ${}_nU(p)$  ( ${}_nU(p) < 0$ ), а якщо  ${}_kU(p) < 0$  для забезпечення умови  $F_1 = F_2$  необхідно змінити (збільшити) величину  ${}_nU(p)$  ( ${}_nU(p) > 0$ ).

На підставі співвідношень (23) і (24) формують алгоритм реалізації способу корекції силової дії при проведенні вібраційних випробувань об'єктів у випадку, якщо маса випробуваного об'єкта перевищує масу рухомої системи вібратора електродинамічного типу.

У подальших дослідженнях варто приділити увагу комп'ютерному моделюванню і експериментальній оцінці отриманих аналітичних співвідношень.

## ВИСНОВКИ

У роботі наведений алгоритм одного способу корекції силової дії при проведенні випробувань на віброміцність, вібронадійність, вібростійкість об'єктів, маса яких перевищує масу рухомої системи електродинамічного вібратора. Отримані аналітичні співвідношення для визначення величини напруги обмотки підмагнічування залежно від величини зміни напруги обмотки збудження. Аналітичні співвідношення отримані за умови урахування інерційності процесів у замкнених колах обмоток збудження і підмагнічування, а також при урахуванні наявності негативного зворотного зв'язку за швидкістю в замкнених колах обмоток збудження і підмагнічування.

## SUMMARY

### AN ALGORITHM FOR CORRECTING THE FORMATION OF FORCE DURING VIBRATION TESTING

*I.D. Puzko,*

*Sumy State University, Sumy*

*In this paper the correcting power algorithm of action is performed for vibrations, vibrosafety, vibration of object whose mass exceeds the mass of the moving system of the electrodynamic vibrator.*

*The analytical relations for determining the voltage bias winding, depending on the magnitude of change in voltage winding are got. Analytical equations are obtained by taking into account the inertia of the loops and windings of bias, as well as the presence of negative feedback on the speed closed-loop windings and bias.*

**Key words:** *vibration testing, force impact formation, correction, inertia, loop windings biasing.*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Божко А.Е. Резонансные виброиспытательные системы / А.Е. Божко, Е.А. Личкастый, О.Ф. Полищук, И.Д. Пузько, В.Н. Савченко. - Киев: Наук. думка, 1992. – 248 с.
2. Кузнецов А.А. Вибрационные испытания элементов и устройств автоматики. - М.:Энергия, 1976. – 120 с.
3. Авт. св. №585423 СССР. МПК 601 М 7/00. Способ проведения вибрационных испытаний // Ю.П. Щуров, А.А. Вишняков, А.И. Войцеховский, В.Л. Попов. - Оpubл. 29.12.77. - Бюл. №47.
4. Божко А.Е. Воспроизведение вибраций. - Киев: Наук-думка, 1975.-192с.
5. Пузько І.Д. Формування постійного силового навантаження електродинамічним вібратором / І.Д. Пузько // Компрессорное и энергетическое машиностроение.- 2008. - №1 (11). - С.109-111.

*Надійшла до редакції 26 грудня 2009 р.*