



УКРАЇНА

(19) UA (11) 12095 (13) U  
(51) МПК  
B06B 1/04 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС

### ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

#### (54) ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИЙ ВІБРАТОР

1

2

(21) u200507640

(22) 01.08.2005

(24) 16.01.2006

(46) 16.01.2006, Бюл. № 1, 2006 р.

(72) Пузько Ігор Данилович, Осіпов Валерій Ана-  
толійович

(73) СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(57) Електродинамічний вібратор, що містить магнітопровід з обмоткою підмагнічування, джерело постійної напруги величиною « $U_n$ », установлену в повітряному зазорі магнітопроводу рухомої котушки, довжина якої більше довжини повітряного зазору, з обмоткою збудження, задавальний генератор, форсуючий блок, перший, другий, третій і четвертий суматори, підсилювач струму, перший і другий блоки диференціювання, перший, другий, третій, четвертий і п'ятий підсилювачі напруги, коло зворотного зв'язку, що містить послідовно з'єднані датчик переміщення рухомої платформи з випробуваним об'єктом і блок зворотного зв'язку, вихід якого з'єднаний з другим входом другого суматора, вихід якого через підсилювач струму з'єднаний з обмоткою збудження рухомої котушки, а перший вхід другого суматора з'єднаний з виходом першого суматора, послідовно з'єднані перший і другий блоки диференціювання, вхід першого з яких з'єднаний з датчиком переміщення рухомої платформи безпосередньо, а через другий підсилювач напруги з'єднаний з першим входом третього суматора, вихід першого блока диференціювання з'єднаний з виходом третього підсилювача напруги, третій вхід третього суматора з'єднаний через четвертий підсилювач напруги з виходом другого блока диференціювання, перший, другий і третій аперіодичні блоки, перший, другий і третій блоки ділення, перший, другий і третій блоки множення, джерело постійної напруги величиною «1», причому вихід задавального генератора через форсуючий блок з'єднаний з входом «Ділене» першого блока ділення, вихід якого з'єднаний з першим входом першого суматора, другий вхід якого з'єднаний з виходом третього суматора безпосередньо, а третій вхід першого суматора з'єд-

наний з виходом третього блока ділення безпосередньо, вхід «Ділене» якого з'єднаний з виходом другого блока множення, а вхід «Подільник» - з виходом третього блока множення, входи якого об'єднані і з'єднані з виходом четвертого суматора, перший вхід якого з'єднаний з виходом джерела постійної напруги величиною «1», а другий вхід з'єднаний з виходом п'ятого підсилювача напруги через третій аперіодичний блок, другий вхід другого блока множення з'єднаний з виходом суматора постійної напруги величиною « $U_n$ » через послідовно з'єднані другий аперіодичний блок, перший підсилювач напруги, перший блок множення, входи якого об'єднані, і перший аперіодичний блок, вихід другого аперіодичного блока з'єднаний з входом «Ділене» другого блока ділення, вхід «Подільник» якого з'єднаний з виходом четвертого суматора, який відрізняється тим, що пристрій додатково містить датчик переміщення рухомої котушки з обмоткою збудження, третій і четвертий блоки диференціювання, шостий підсилювач напруги, фазовий детектор, значочутливий елемент, перший і другий комутатори, причому вихід датчика переміщення рухомої котушки з обмоткою збудження через послідовно з'єднані третій і четвертий блоки диференціювання і шостий підсилювач напруги з'єднаний з другим входом другого комутатора, перший вхід якого з'єднаний з виходом третього підсилювача напруги, а вихід другого комутатора з'єднаний з другим входом третього суматора, перший вхід першого комутатора з'єднаний з виходом першого блока диференціювання, а другий вхід - з виходом третього блока диференціювання, вихід першого комутатора з'єднаний з об'єднаними входом п'ятого підсилювача напруги і першим входом другого блока множення, керувальні входи першого і другого комутаторів об'єднані і з'єднані з виходом значочутливого елемента, вхід якого з'єднаний з виходом фазового детектора, перший і другий входи якого з'єднані з виходом датчика переміщення рухомої платформи і виходом датчика переміщення рухомої котушки з обмоткою збудження.

Корисна модель відноситься до області вібраційної техніки, а саме, до електродинамічних збу-

джувачів коливань і може знайти застосування як джерело механічних коливань в стендах для віб-

UA (19) 12095 (11) 12095 (13) U

розбудження і моделювання різних типів вібраційних навантажень.

Відомий електродинамічний вібратор, що містить магнітопровід з обмоткою підмагнічування, установлену в повітряному зазорі магнітопроводу рухому циліндричну котушку, довжина якої більша довжини повітряного зазору, задавальний генератор, перший і другий суматори, підсилювач струму, перший і другий блоки диференціювання, коло зворотного зв'язку, що містить послідовно з'єднані датчик переміщення рухомої циліндричної котушки і блок зворотного зв'язку, вихід якого з'єднаний з другим входом другого суматора, вихід якого через підсилювач струму з'єднаний з рухомою циліндричною котушкою, вихід датчика переміщення рухомої котушки з'єднаний з входом першого блока диференціювання, вихід якого з'єднаний з входом другого блока диференціювання, перший, другий, третій, четвертий і п'ятий підсилювачі напруги, форсуючий блок, третій блок диференціювання і третій суматор, причому вихід задавального генератора через послідовно з'єднані перший підсилювач напруги і форсуючий блок з'єднаний з першим входом першого суматора, другий вхід якого через третій блок диференціювання з'єднаний з виходом третього суматора, перший вхід якого через другий підсилювач напруги з'єднаний з виходом датчика переміщення рухомої циліндричної котушки, другий вхід через третій підсилювач напруги з'єднаний з виходом першого блока диференціювання, а третій вхід через четвертий підсилювач напруги з'єднаний з виходом другого блока диференціювання, вихід датчика переміщення рухомої циліндричної котушки через п'ятий суматор з'єднаний з третім входом першого суматора. [див. деклараційний патент України на винахід №45161, МПК В06В 1/04, 2001].

Недоліком відомого пристрою є недостатня точність формування заданого силового навантаження на випробуваний об'єкт, що пояснюється недостатньою точністю прийнятої для формування алгоритму керування математичної моделі електродинамічного вібратора, яка враховує тільки механічні процеси його функціонування і електричні процеси в обмотці котушки збудження і не враховує всі електричні процеси з урахуванням зворотного зв'язку в обмотці котушки підмагнічування, що також призводить до зменшення К.К.Д. електродинамічного вібратора.

За найближчий аналог вибрано електродинамічний вібратор, що містить магнітопровід з обмоткою підмагнічування, джерело постійної напруги підмагнічування, установлену в повітряному зазорі магнітопроводу рухому циліндричну котушку, довжина якої більше довжини повітряного зазору, задавальний генератор, форсуючий блок, перший, другий і третій суматори, підсилювач струму, перший і другий блоки диференціювання, перший, другий, третій і четвертий підсилювачі напруги, коло зворотного зв'язку, що містить послідовно з'єднані датчик переміщення рухомої платформи з котушкою і блок зворотного зв'язку, вихід якого з'єднаний з другим входом другого суматора, вихід якого через підсилювач струму з'єднаний з обмоткою збудження рухомої котушки, а перший вхід другого суматора з'єднаний з виходом першого

суматора, послідовно з'єднані перший і другий блоки диференціювання, вхід першого з яких з'єднаний з датчиком переміщення рухомої платформи безпосередньо, а через другий підсилювач напруги з'єднаний з першим входом третього суматора, другий вхід якого через третій підсилювач напруги з'єднаний з виходом першого блока диференціювання, третій вхід третього суматора з'єднаний через четвертий підсилювач напруги з виходом другого блока диференціювання, перший і другий аперіодичні блоки, перший блок ділення, перший і другий блоки множення, при цьому вихід задавального генератора через послідовно з'єднані форсуючий блок і перший блок ділення з'єднаний з першим входом першого суматора, другий вхід якого з'єднаний з виходом третього суматора безпосередньо, один вхід другого блока множення з'єднаний з виходом першого блока диференціювання, а другий вхід через послідовно з'єднані другий аперіодичний блок, перший підсилювач напруги, перший блок множення, перший і другий входи якого об'єднані, і перший аперіодичний блок з'єднаний з виходом джерела постійної напруги, пристрій також додатково містить п'ятий підсилювач напруги, третій аперіодичний блок, другий і третій блоки ділення, третій блок множення, четвертий суматор і джерело постійної напруги величиною «1», причому вихід першого блока диференціювання через послідовно з'єднані п'ятий підсилювач напруги і третій аперіодичний блок з'єднаний з другим входом четвертого суматора, перший вхід якого з'єднаний з виходом джерела постійної напруги величиною «1», а вихід четвертого суматора з'єднаний з об'єднаними першим і другим входами третього блока множення і входом «Подільник» другого блока ділення, вхід «Ділене» якого з'єднаний з виходом другого аперіодичного блока, а вихід - з входом «Подільник» першого блока ділення, вихід третього блока множення з'єднаний з входом «Подільник» третього блока ділення, вхід «Ділене» якого з'єднаний з виходом другого блока множення, а вихід третього блока ділення з'єднаний з третім входом першого суматора [див. деклараційний патент України №70115, МПК В06 В 1/04, 2004 р.].

Недоліком відомого пристрою є недостатня точність формування заданого силового навантаження на випробуваний об'єкт, що пояснюється недостатньою точністю прийнятої для формування алгоритму керування вібратора математичної моделі електродинамічного вібратора, яка враховує електричні процеси в обмотці котушки збудження і підмагнічування і механічні процеси переміщення рухомої системи вібратора.

Однак, у відомому пристрої математична модель, що описує механічний процес коливання рухомої системи електродинамічного вібратора (платформи разом з випробуваним об'єктом і котушкою збудження) відповідає діапазону низьких частот, тобто частотному діапазону, в якому має жорстке з'єднання платформи, випробуваного об'єкту і остову котушки збудження. Диференціальне рівняння в цьому випадку відповідає коливальній системі з одним ступенем вільності.

Для електродинамічного вібратора в області високих частот необхідно урахувати гнучке з'єднання між платформою електродинамічного вібра-

тора і остовом котушки збудження.

В цьому діапазоні частот математична модель процесу коливання рухомої системи вібратора моделюється системою диференціальних рівнянь, які відповідають колівальній системі з двома ступенями вільності.

Таким чином, відомий пристрій не враховує зміни математичної моделі електродинамічного вібратора в різних частотних діапазонах при формуванні заданого силового навантаження на випробуваний об'єкт, що обмежує функціональні можливості пристрою, а це призводить також до зниження ККД електродинамічного вібратора і обмежує область його застосування.

В основу корисної моделі поставлене завдання створити такий електродинамічний вібратор, в якому за рахунок нової структурної схеми системи керування, що моделює процеси в механічній системі вібратора при урахуванні ділянок частотного діапазону при відтворенні вібрацій, відбувається розширення частотного діапазону формування заданого силового навантаження на випробуваний об'єкт, що призводить до підвищення ККД електродинамічного вібратора і розширення області його застосування.

Поставлене завдання вирішується тим, що електродинамічний вібратор, що містить магнітопровід з обмоткою підмагнічування, джерело постійної напруги величиною « $U_n$ », установлену в повітряному зазорі магнітопроводу рухому котушку, довжина якої більше довжини повітряного зазору, з обмоткою збудження, задавальний генератор, форсуючий блок, перший, другий, третій і четвертий суматори, підсилювач струму, перший і другий блоки диференціювання, перший, другий, третій, четвертий і п'ятий підсилювачі напруги, коло зворотного зв'язку, що містить послідовно з'єднані датчик переміщення рухомої платформи з випробуваним об'єктом і блок зворотного зв'язку, вихід якого з'єднаний з другим входом другого суматора, вихід якого через підсилювач струму з'єднаний з обмоткою збудження рухомої котушки, а перший вхід другого суматора з'єднаний з виходом першого суматора, послідовно з'єднані перший і другий блоки диференціювання, вхід першого з яких з'єднаний з датчиком переміщення рухомої платформи безпосередньо, а через другий підсилювач напруги з'єднаний з першим входом третього суматора, вихід першого блока диференціювання з'єднаний з входом третього підсилювача напруги, третій вхід третього суматора з'єднаний через четвертий підсилювач напруги з виходом другого блока диференціювання, перший, другий і третій аперіодичні блоки, перший, другий і третій блоки ділення, перший, другий і третій блоки множення, джерело постійної напруги величиною «1», причому вихід задавального генератора через форсуючий блок з'єднаний з входом «Ділене» першого блока ділення, вихід якого з'єднаний з першим входом першого суматора, другий вхід якого з'єднаний з виходом третього суматора безпосередньо, а третій вхід першого суматора з'єднаний з виходом третього блока ділення безпосередньо, вхід «Ділене» якого з'єднаний з виходом другого блока множення, а вхід «Подільник» - з виходом третього блока множення, входи якого

об'єднані і з'єднані з виходом четвертого суматора, перший вхід якого з'єднаний з виходом джерела постійної напруги величиною «1», а другий вхід з'єднаний з виходом п'ятого підсилювача напруги через третій аперіодичний блок, другий вхід другого блока множення з'єднаний з виходом джерела постійної напруги величиною « $U_n$ » через послідовно з'єднані другий аперіодичний блок, перший підсилювач напруги, перший блок множення, входи якого об'єднані, і перший аперіодичний блок, вихід другого аперіодичного блока з'єднаний з входом «Ділене» другого блока ділення, вхід «Подільник» якого з'єднаний з виходом четвертого суматора, згідно з корисною моделлю, пристрій додатково містить датчик переміщення рухомої котушки з обмоткою збудження, третій і четвертий блоки диференціювання, шостий підсилювач напруги, фазовий детектор, значочутливий елемент, перший і другий комутатори, причому вихід датчика переміщення рухомої котушки з обмоткою збудження через послідовно з'єднані третій і четвертий блоки диференціювання і шостий підсилювач напруги з'єднаний з другим входом другого комутатора, перший вхід якого з'єднаний з виходом третього підсилювача напруги, а вихід другого комутатора з'єднаний з другим входом третього суматора, перший вхід першого комутатора з'єднаний з виходом першого блока диференціювання, а другий вхід - з виходом третього блока диференціювання, вихід першого комутатора з'єднаний з об'єднаними входом п'ятого підсилювача напруги і першим входом другого блока множення, керувальні входи першого і другого комутаторів об'єднані і з'єднані з виходом значочутливого елемента, вхід якого з'єднаний з виходом фазового детектора, перший і другий входи якого з'єднані з виходом датчика переміщення рухомої платформи і виходом датчика переміщення рухомої котушки з обмоткою збудження.

Застосування запропонованого електродинамічного вібратора з усіма суттєвими ознаками, включаючи відмінні, дозволяє розширити частотний діапазон формування заданого силового навантаження на випробуваний об'єкт, що призводить до підвищення ККД і розширення області застосування.

Пояснюється це наступним.

Розробка алгоритму формування заданого силового навантаження на випробуваний об'єкт при відтворенні вібрації базується на наступних міркуваннях.

Механічне переміщення рухомої системи вібратора в діапазоні низьких частот моделюється диференціальним рівнянням другого порядку, що відповідає колівальній системі з одним ступенем вільності і в операційній формі має вигляд:

$$(Mp^2 + bp + c)X(p) + R(p) = B_n(p) |k|k(p), \quad (1)$$

де  $M$  - маса рухомої системи вібратора разом з випробуваним об'єктом;

$b$  - коефіцієнт демпфування;

$c$  - коефіцієнт жорсткості підвіски рухомої системи вібратора;

$X(p)$  - операційне зображення переміщення рухомої системи вібратора;

$R(p)$  - операційне зображення сили реакції, що діє між випробуваним об'єктом і платформою віб-

ратора, жорстко з'єднаною з рухомою котушкою з обмоткою збудження;

$B_n(p)$  - операційне зображення магнітної індукції в повітряному зазорі магнітопровода, що формується при надходженні струму в обмотку підмагнічування вібратора;

$l_k$  - довжина дроту обмотки котушки збудження;

$I_k(p)$  - операційне зображення струму, що протікає в обмотці рухомої котушки збудження вібратора;

$p=d/dt$  - оператор диференціювання.

Електричні процеси в замкненому колі обмотки (обмотки збудження) рухомої котушки вібратора моделюється диференціальним рівнянням першого порядку, що в операційній формі має вигляд:

$$(pL_k + r_k)I_k(p) = U_k(p) - B_n(p)I_n(p)X(p), \quad (2)$$

де:  $L_k$  - індуктивність обмотки рухомої котушки;

$r_k$  - опір обмотки рухомої котушки;

$U_k(p)$  - операційне зображення напруги, що подається для живлення струмом  $I_k(p)$  обмотки збудження рухомої котушки.

Електричні процеси в замкненому колі обмотки котушки підмагнічування для створення магнітної індукції в повітряному зазорі магнітопровода вібратора моделюються диференціальним рівнянням першого порядку, що в операційній формі має вигляд:

$$(pL_n + r_n)I_n(p) = U_n(p) - B_n(p)I_n(p)X(p), \quad (3)$$

де:  $L_n$  - індуктивність обмотки підмагнічування;

$r_n$  - опір обмотки підмагнічування;

$I_n(p)$  - операційне зображення струму, що протікає в обмотці підмагнічування і створює магнітну індукцію  $B_n(p)$ ,

$U_n(p)$  - операційне зображення напруги, що подається для живлення струмом  $I_n(p)$  обмотки під-

$$Mp^2X(p) + \left[ b + \frac{K_n^2 I_k^2 U_n^2(p)}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X(p)}{pL_n + r_n} \right)^2} \right] pX(p) + cX(p) + R(p) = \frac{K_n I_k U_n(p) U_k(p)}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X(p)}{pL_n + r_n} \right)} \quad (8)$$

Для формування співвідношення:

$$R(p) = K_n I_k U_k(p) \quad (9)$$

необхідно розробити структурну схему, алгоритм функціонування якої відповідає співвідношенню (8), а саме, необхідно сформулювати компенсаційну напругу для компенсації окремих додатних сил в операційній формі. Такі додатні сили мають вигляд:

$$Mp^2X(p), bX(p), \frac{K_n^2 I_k^2 U_n^2(p) p X(p)}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X(p)}{pL_n + r_n} \right)^2}, cX(p) \quad (10)$$

При виконанні умови компенсації цих сил (10) із (8) отримаємо співвідношення :

$$R(p) = \frac{K_n I_k U_n(p) U_k(p)}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X(p)}{pL_n + r_n} \right)} \quad (11)$$

Для виконання умови (9) необхідно провести корекцію напруги  $U_k(p)$  з виходу задавального генератора, а саме сформулювати  $U_k^*(p)$  у вигляді:

магнічування;

$l_n$  - довжина дроту обмотки підмагнічування.

Застосуємо також закон Ома для магнітного кола в операційній формі:

$$I_n(p)W_n = B_n(p)S/G, \quad (4)$$

де:  $W_n$  - кількість витків обмотки підмагнічування ;

$G$  - магнітна провідність повітряного зазору, де знаходиться обмотка збудження рухомої котушки;

$S$  - площа поперечного перерізу повітряного зазору магнітопровода.

Із (4) маємо співвідношення:

$$K_n I_n(p) = B_n(p), \quad (5)$$

де:  $K_n = GW_n/S$ .

Із (3), (5) отримаємо таке співвідношення для визначення  $B_n(p)$ :

$$B_n(p) = \frac{K_n U_n(p)}{pL_n + r_n \left( 1 + \frac{K_n I_n p X(p)}{pL_n + r_n} \right)} \quad (6)$$

Із (2), (6) отримаємо співвідношення для визначення  $I_k(p)$ :

$$I_k(p) = \frac{U_k(p)}{(pL_k + r_k)} - \frac{K_n I_k U_n(p) p X(p)}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X(p)}{pL_n + r_n} \right)} \quad (7)$$

Приймаючи до уваги співвідношення (1), (6), (7), отримаємо рівняння для визначення сили  $R(p)$  реакції в операційній формі, що дорівнює заданому силовому навантаженню на випробуваний об'єкт:

$$U_k^*(p) = U_k(p) \frac{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X(p)}{pL_n + r_n} \right)}{U_n(p)} \quad (12)$$

і замість  $U_k(p)$  у співвідношенні (11) необхідно застосувати  $U_k^*(p)$ . Враховуючи (11), (12), отримаємо співвідношення для визначення сили реакції  $R(p)$

$$R(p) = K_n I_k U_k(p) = K_u U_k(p), \quad (13)$$

де:  $K_u = K_n I_k$ .

При роботі електродинамічного вібратора в області високих частот, тобто при наявності нежорсткого зв'язку між остовом рухомої котушки і платформою вібратора, механічне переміщення рухомої платформи і остова котушки збудження вібратора моделюється системою двох диференціальних рівнянь другого порядку, що відповідає коливальній системі з двома ступенями вільності і в операційній формі при неврахуванні демпфування має вигляд

$$\left. \begin{aligned} M_1 p^2 X_1 + c_1 X_1 + c_2 (X_1 - X_2) + R &= 0 \\ m_2 p^2 X_2 + c_2 (X_2 - X_1) &= F_2 = B l_k I_k \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

де  $M_1$  - сумарна маса рухомої платформи вібратора разом з випробуваним об'єктом;  
 $m_2$  - маса остову котушки збудження вібратора;

$c_1, c_2$  - коефіцієнти жорсткості підвіски платформи вібратора разом з випробуваним об'єктом і остову котушки збудження відповідно;

$X_1(p)$  - операційне зображення переміщення рухомої платформи вібратора разом з випробуваним об'єктом;

$X_2(p)$  - операційне зображення переміщення остова котушки збудження;

$R_1(p)$  - операційне зображення сили реакції, що діє між випробуваним об'єктом і платформою вібратора;

$B_n(p)$  - операційне зображення магнітної індукції в повітряному зазорі магнітопровода, що формується при надходженні струму  $I_n(p)$  в обмотку підмагнічування вібратора;

$l_k$  - довжина дроту обмотки котушки збудження;

$I_k(p)$  - операційне зображення струму, що надходить в обмотку рухомої котушки збудження вібратора;

$P = d/dt$  - оператор диференціювання;  $p^2 = d^2/dt^2$ .

Електродинамічні процеси в замкненому колі обмотки збудження вібратора моделюються диференціальними рівняннями першого порядку, що в операційній формі має вигляд:

$$(pL_k + r_k) I_k(p) = U_k(p) - B(p) I_n(p) X_2(p) \quad (15)$$

де:  $L_k$  - індуктивність обмотки котушки збудження;

$r_k$  - опір обмотки рухомої котушки збудження;

$U_k(p)$  - операційне зображення напруги, що подається для живлення струмом обмотки збудження.

Електричні процеси в замкненому колі обмотки котушки підмагнічування для створення магнітної індукції в повітряному зазорі магнітопровода вібратора моделюються диференціальними рівняннями першого порядку, що в операційній формі має вигляд:

$$\begin{aligned} F_2 = B l_k I_k &= K_n I_n I_k = \frac{K_n I_k U_n}{(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X_2}{pL_n + r_n} \right)} \times \left\{ \frac{U_k}{(pL_k + r_k)} - \frac{K_n I_k p X_2}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X_2}{pL_n + r_n} \right)} \right\} = \\ &= \frac{K_n I_k U_n U_k}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X_2}{pL_n + r_n} \right)} - \frac{K_n^2 I_k^2 U_n^2 p X_2}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X_2}{pL_n + r_n} \right)^2} \end{aligned} \quad (22)$$

Застосовуючи співвідношення (18) і (22), отримаємо співвідношення для визначення  $R_1$  в операційній формі

$$R_1 = M_1 p^2 X_1 + m_2 p^2 X_2 + c_1 X_1 - \frac{K_n I_k U_n U_k}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X_2}{pL_n + r_n} \right)} + \frac{K_n^2 I_k^2 U_n^2 p X_2}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X_2}{pL_n + r_n} \right)^2} \quad (23)$$

$$(pL_n + r_n) I_n(p) = U_n(p) - B_n(p) I_n(p) X_2(p), \quad (16)$$

де  $L_n$  - індуктивність обмотки котушки підмагнічування;

$r_n$  - опір обмотки котушки підмагнічування;

$I_n(p)$  - операційне зображення струму, що надходить в обмотку підмагнічування;

$U_n(p)$  - операційне зображення напруги, що подається для живлення струмом  $I_n(p)$  обмотки підмагнічування;

$l_n$  - довжина дроту обмотки підмагнічування.

Застосуємо також закон Ома для магнітного кола в операційній формі:

$$I_n(p) W_n = B(p) S / G, \quad (17)$$

де:  $W_n$  - число витків обмотки підмагнічування;

$S$  - площа повітряного зазору магнітопровода.

$G$  - магнітна провідність повітряного зазору.

Із системи рівнянь (14) маємо таке співвідношення

$$R_1 = M_1 p^2 X_1 + m_2 p^2 X_2 + c_1 X_1 - F_2 \quad (18)$$

Приймаючи до уваги (15), (16), (17), отримаємо співвідношення для визначення  $F_2$  в операційній формі, а саме, маємо систему рівнянь в операційній формі

$$\left. \begin{aligned} F_2 &= B l_k I_k, \\ (pL_k + r_k) I_k &= U_k - B l_k p X_2, \\ (pL_n + r_n) I_n &= U_n - B_n I_n p X_2, \\ I_n W_n &= B S / G, \quad K_n I_n = B, \\ K_n &= W_n G / S. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Із третього і четвертого рівнянь системи (19) отримаємо співвідношення для визначення  $I_n$  в операційній формі

$$I_n = U_n / (pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X_2}{pL_n + r_n} \right). \quad (20)$$

Із другого, третього і четвертого рівнянь системи (19) отримаємо співвідношення для визначення  $I_k$  в операційній формі

$$I_k = \frac{U_k}{(pL_k + r_k)} - \frac{K_n I_k p X_2}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_n I_n p X_2}{pL_n + r_n} \right)}. \quad (21)$$

Приймаючи до уваги перше рівняння системи (19), а також співвідношення (20) і (21), отримаємо співвідношення для визначення  $F_2$  в операційній формі

Для формування співвідношення

$$R_1 = K_{n1k} U_k \quad (24)$$

необхідно розробити структурну схему, алгоритм функціонування якої відповідає співвідношенню (23), а саме, необхідно сформувати сигнал для компенсації окремих сил в операційній формі

$$M_1 p^2 X_1, m_2 p^2 X_2, c_1 X_1, \frac{K_{n1k}^2 U_n^2 p X_2}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left(1 + \frac{K_{n1n} p X_2}{pL_n + r_n}\right)^2} \quad (25)$$

При умові компенсації цих сил маємо співвідношення:

$$R_1 = \frac{K_{n1k} U_n U_k}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left(1 + \frac{K_{n1n} p X_2}{pL_n + r_n}\right)} \quad (26)$$

Для виконання умови (24) необхідно провести корекцію напруги  $U_k(p)$  з виходу задавального генератора, а саме, сформувати  $U_k(p)$  у вигляді:

$$U_k^*(p) = U_k(p) \frac{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left(1 + \frac{K_{n1n} p X_2}{pL_n + r_n}\right)}{U_n(p)} \quad (27)$$

і замість  $U_k(p)$  у співвідношенні (3.6) необхідно застосувати  $U_k^*(p)$ .

На кресленні приведена структурна схема електродинамічного вібратора.

Електродинамічний вібратор містить магнітопрвід 1 з обмоткою 2 підмагнічування, джерело 3 постійної напруги величиною « $U_n$ », установлену в повітряному зазорі магнітопровода 1 рухому циліндричну котушку 4 з обмоткою 5 збудження, задавальний генератор 6, перший і другий суматори 7, 8 відповідно, підсилювач 9 струму, датчик 10 переміщення рухомої платформи з випробуванням об'єктом (на кресленні не показані), датчик 11 переміщення рухомої котушки 4 з обмоткою 5 збудження, блок 12 зворотного зв'язку, перший, другий, третій і четвертий блоки 13, 14, 15, 16 диференціювання відповідно, перший, другий, третій, четвертий, п'ятий і шостий підсилювачі 17, 18, 19, 20, 21 і 22 напруги відповідно, форсуючий блок 23, перший, другий і третій аперіодичні блоки 24, 25, 26 відповідно, перший, другий і третій блоки 27, 28, 29 ділення відповідно, перший, другий і третій блоки 30, 31, 32 множення відповідно, третій і четвертий суматори 33 і 34 відповідно, фазовий детектор 35, перший і другий комутатори 36, 37, значочутливий елемент 38, джерело 39 напруги величиною «1».

Блоки і елементи електродинамічного вібратора з'єднані таким чином.

Вихід першого блока 27 ділення з'єднаний з першим входом першого суматора 7, вихід якого через послідовно з'єднані другий суматор 8 і підсилювач 9 струму з'єднаний з обмоткою 5 збудження, що розташована на рухомій котушці 4 вібратора.

На рухомій платформі вібратора розташований випробуваний об'єкт і датчик 10 переміщення рухомої платформи.

На рухомій котушці 4 з обмоткою 5 збудження розташований датчик 11 переміщення рухомої котушки 4.

Датчик 10 переміщення рухомої платформи

вібратора через блок 12 зворотного зв'язку з'єднаний з другим входом другого суматора 8, а через другий підсилювач 18 напруги - з першим входом третього суматора 33. Вихід датчика 10 переміщення рухомої платформи вібратора через послідовно з'єднані перший і другий блоки 13, 14 диференціювання відповідно і четвертий підсилювач 20 напруги з'єднаний з третім входом третього суматора 33, другий вхід якого з'єднаний з виходом другого комутатора 37.

Вихід третього суматора 33 з'єднаний з другим входом першого суматора 7, третій вхід якого з'єднаний з виходом третього блока 29 ділення, вхід «Ділене» якого з'єднаний з виходом другого блока 31 множення, другий вхід якого через послідовно з'єднані другий аперіодичний блок 25, перший підсилювач 17 напруги, перший блок 30 множення, другий вхід якого об'єднаний з першим входом, перший аперіодичний блок 24 з'єднаний з виходом джерела 3 постійної напруги величиною « $U_n$ », що формує струм  $I_n$  обмотки підмагнічування вібратора. Вихід п'ятого підсилювача 21 напруги з'єднаний з входом третього аперіодичного блока 26, вихід якого з'єднаний з другим входом четвертого суматора 34, перший вхід якого з'єднаний з виходом джерела 39 напруги величиною «1».

Вихід четвертого суматора 34 з'єднаний з об'єднаними входами третього блока 32 множення і входом «Подільник» другого блока 28 ділення, вихід якого з'єднаний з входом «Подільник» першого блока 27 ділення, вхід «Ділене» якого з'єднаний через форсуючий блок 23 з виходом задавального генератора 6. Вхід «Ділене» другого блока 28 ділення з'єднаний з виходом другого аперіодичного блока 25.

Вихід датчика 11 переміщення рухомої котушки 4 з обмоткою 5 збудження через послідовно з'єднані третій і четвертий блоки 15 і 16 диференціювання і шостий підсилювач 22 напруги з'єднаний з другим входом другого комутатора 37, перший вхід якого через третій підсилювач 19 напруги з'єднаний з виходом першого блока 13 диференціювання, вихід якого з'єднаний з першим входом першого комутатора 36, другий вхід якого з'єднаний з виходом третього блока 15 диференціювання, вихід першого комутатора 36 з'єднаний з об'єднаними входами п'ятого підсилювача 21 напруги і другим входом другого блока 31 множення. Керувальні входи першого і другого комутаторів 36 і 37 об'єднані і через значочутливий елемент 38 з'єднані з виходом фазового детектора 35, входи якого з'єднані з виходами датчиків 10 і 11 переміщення.

Електродинамічний вібратор функціонує таким чином.

Живлення обмотки 5 збудження рухомої котушки 4 відбувається струмом з виходу підсилювача 9 струму. При відсутності різниці фаз між платформою вібратора і остовом рухомої котушки 4 з обмоткою 5 збудження платформа разом з рухомою котушкою 4 і випробуванням об'єктом переміщується за рахунок дії електромагнітної сили, що пропорційна величині струму на виході підсилювача 9 струму.

Такий випадок має місце при нульовій різниці

фаз сигналів з виходів датчиків 10 і 11 переміщен-  
ня відповідно.

На виході фазового детектора 35 маємо ну-  
льовий сигнал, на виході знаочутливого елемента  
38 також має місце нульовий сигнал, тому на ке-  
рувальних входах першого і другого комутаторів  
36 і 37 - нульові сигнали.

На вихід першого комутатора 36 надходить си-  
гнал  $pX_1$  з виходу першого блока 13 диференцію-  
вання, а на вихід другого комутатора 37 надходить  
сигнал  $pX_1$  з виходу першого блока 13 диференці-  
ювання після проходження через третій підсилю-  
вач 19 напруги з коефіцієнтом підсилення «b»,  
тобто сигнал  $bpX_1$ .

Механічне переміщення (коливання) рухо-  
мої платформи з випробуванням об'єктом відбувається  
по закону, що відповідає співвідношенню (1), елек-  
тричні процеси в замкненому колі обмотки 5 збу-  
дження відповідають співвідношенню (2), електри-  
чні процеси в замкненому колі обмотки  
підмагнічування відповідають співвідношенням (3),  
(4), (5) (6).

Коло зворотного зв'язку, що містить датчик 10  
переміщення рухомої платформи з випробуванням  
об'єктом і блок 12 зворотного зв'язку, вводиться  
для створення електромагнітної підвіски платформи  
з коефіцієнтом жорсткості  $c_1$ .

Для реалізації співвідношення (9) формується  
структурна схема, алгоритм функціонування якої  
відповідає співвідношенню (8).

На виході задавального генератора 6 форму-  
ється сигнал, що в операційній формі дорівнює  
 $U_k(p)$ . Цей сигнал  $U_k(p)$  через форсуючий блок 23,  
передатна функція якого дорівнює  $(pL_k+r_k)$ , надхо-  
дить на вхід «Ділене» першого блока 27 ділення,  
на вхід «Подільник» якого надходить сигнал

$U_n(p)/(pL_n+r_n) \left( 1 + \frac{K_{n1n}pX_1}{(pL_n+r_n)} \right)$  з виходу другого

блока 28 ділення, на вхід «Ділене» якого надхо-  
дить сигнал  $U_n/(pL_n+r_n)$  з виходу другого аперіодич-  
ного блока 25, передатна функція якого дорівнює  
 $(pL_n+r_n)^{-1}$ , а на вхід «Подільник» - сигнал з виходу  
четвертого суматора 34.

Сигнал на виході четвертого суматора 34 фо-  
рмується таким чином. На виході першого кому-  
татора 36 сигнал дорівнює величині  $pX_1$ . Після про-  
ходження п'ятого підсилювача 21 напруги цей  
сигнал має величину  $K_{n1n}pX_1$ , а після проходження  
третього аперіодичного блока 26 на другий вхід  
четвертого суматора 34 надходить сигнал  
 $K_{n1n}pX_1/(pL_n+r_n)$ . На перший вхід четвертого сум-  
атора 34 надходить сигнал «1» з виходу джерела  
39 напруги величиною «1». На виході четвертого  
суматора 34 формується сигнал величиною  
 $1+K_{n1n}pX_1/(pL_n+r_n)$ .

Таким чином, на вхід «Подільник» другого  
блока 28 ділення надходить сигнал, що дорівнює

величині  $\left( 1 + \frac{K_{n1n}pX_1}{(pL_n+r_n)} \right)$ , а на виході другого блока

28 ділення формується сигнал, що дорівнює вели-  
чині

$U_n/(pL_n+r_n) \left( 1 + \frac{K_{n1n}pX_1}{(pL_n+r_n)} \right)$ , який надходить на

вхід «Подільник» першого блока 27 ділення.

Сигнал, що дорівнює величині

$U_k(p) \frac{(pL_k+r_k)(pL_n+r_n) \left( 1 + \frac{K_{n1n}pX_2}{pL_n+r_n} \right)}{U_n(p)}$ , з виходу

першого блока 27 ділення надходить на перший  
вхід першого суматора 7.

На другий вхід першого суматора 7 надходить  
сигнал з виходу третього суматора 33, а на третій  
вхід - сигнал з виходу третього блока 29 ділення.

Сигнал  $X_1(p)$  з виходу датчика 10 переміщення  
рухомої платформи після проходження через пос-  
лідовно з'єднані перший і другий блоки 12 і 13 ди-  
ференціювання і четвертий підсилювач 20 напруги  
з передатною функцією, що дорівнює величині  $M_1$ ,  
у вигляді  $M_1p^2X_1(p)$  надходить на третій вхід тре-  
тього суматора 33. На другий вхід третього сум-  
атора 33 надходить сигнал  $b_1pX_1(p)$ , що формуєть-  
ся після проходження сигналу  $pX_1(p)$  з виходу  
першого блока 13 диференціювання через третій  
підсилювач 19, передатна функція якого дорівнює  
постійній величині «b» і другий комутатор 37. На  
перший вхід третього суматора 33 надходить сиг-  
нал  $X_1$  з виходу датчика 10 переміщення рухо-  
мої платформи після проходження через другий під-  
силювач 18 напруги, передатна функція якого до-  
рівнює « $c_1$ ». Цей сигнал дорівнює величині  $c_1X_1(p)$ .

Таким чином, сигнал  $U_3(p)$  в операційній формі  
на виході третього суматора 33 дорівнює величині  
(в операційній формі)

$U_3(p) = M_1p^2X_1(p) + b_1pX_1(p) + c_1X_1(p)$ .

Сигнал  $U_n(p)$  в операційній формі з виходу  
джерела 3 постійної напруги надходить на вхід  
другого аперіодичного блока 25, передатна функ-  
ція якого дорівнює величині  $(pL_n+r_n)^{-1}$ .

Сигнал  $\frac{U_n(p)}{(pL_n+r_n)}$  з виходу другого аперіодич-

ного блока 25 надходить на об'єднані входи пер-  
шого підсилювача 17 напруги із коефіцієнтом під-  
силення  $K_{n1k}$  і на вхід «Ділене» другого блока 28  
ділення.

Сигнал  $K_{n1k}U_n(p)/(pL_n+r_n)$  з виходу першого під-  
силювача 17 напруги надходить на об'єднані вхо-  
ди першого блока 30 множення, сигнал в опера-  
ційній формі на виході якого дорівнює величині  
 $[K_{n1k}U_n(p)/(pL_n+r_n)]^2$ .

Сигнал з виходу першого блока 30 множення  
надходить на вхід першого аперіодичного блока  
24, передатна функція якого дорівнює величині  
 $(pL_k+r_k)^{-1}$ .

Сигнал, що дорівнює величині  
 $[K_{n1k}U_n(p)/(pL_n+r_n)]^2/(pL_k+r_k)^{-1}$ , з виходу першого  
аперіодичного блока 24, передатна функція якого  
дорівнює величині  $1/(pL_k+r_k)$ , надходить на другий  
вхід другого блока 31 множення, на перший вхід  
якого надходить сигнал  $pX_1(p)$  з виходу першого  
блока 13 диференціювання після надходження  
через перший комутатор 36. Сигнал, що дорівнює  
величині

$pX_1(p)[K_{n1k}U_n(p)/(pL_n+r_n)]^2/(pL_k+r_k)$ , з виходу дру-  
гого блока 31 множення надходить на вхід «Діле-  
не» третього блока 29 ділення, на вхід «Поділь-  
ник» якого надходить сигнал з виходу третього  
блока 32 множення, який формується таким чи-

ном.

Сигнал  $X_1(p)$  з виходу першого блока 13 диференціювання через перший комутатор 36 надходить на вхід п'ятого підсилювача 21 напруги з коефіцієнтом підсилення  $K_{n1n}$ , сигнал величиною  $K_{n1n}pX_1(p)$  з виходу якого надходить на вхід третього аперіодичного блока 26, передатна функція якого дорівнює величині  $(pL_n+r_n)^{-1}$ , а сигнал на виході якого дорівнює величині  $K_{n1n}pX_1(p)/(pL_n+r_n)$ .

Цей сигнал надходить на другий вхід четвертого суматора 34, на перший вхід якого надходить сигнал величини «1» з виходу джерела 39 постійної напруги «1».

Сигнал з виходу четвертого суматора 34, що дорівнює величині  $1 + \frac{K_{n1n}pX_1(p)}{(pL_n+r_n)}$ , надходить на

об'єднані входи третього блока 32 множення і вхід «Подільник» другого блока 28 ділення.

Сигнал, що дорівнює величині  $\left[1 + \frac{K_{n1n}pX_1(p)}{(pL_n+r_n)}\right]^2$ , з виходу третього блока 32 мно-

ження надходить на вхід «Подільник» третього блока 29 ділення, сигнал на виході якого дорівнює величині

$$pX_1(p) \frac{K_{n1n}U_n(p)/(pL_n+r_n)^2}{(pL_k+r_k) \left[1 + \frac{K_{n1n}pX_1(p)}{(pL_n+r_n)}\right]^2}$$

і надходить на третій вхід першого суматора 7. На другий вхід першого суматора 7 надходить сигнал, що дорівнює величині  $M_1p^2X_1(p)+b_1X_1(p)+c_1X_1(p)$  з виходу третього суматора 33.

На перший вхід першого суматора 7 надходить сигнал з виходу першого блока 27 ділення, який формується таким чином.

Сигнал  $U_k(p)$  з виходу задавального генератора 6 через форсуючий блок 23, передатна функція якого дорівнює величині  $(pL_k+r_k)$  надходить на вхід «Ділене» першого блока 27 ділення, на вхід «Подільник» якого надходить сигнал з виходу другого блока 28 ділення, який формується таким чином.

На вхід «Ділене» другого блока 28 ділення надходить сигнал  $U_n(p)/(pL_n+r_n)$  з виходу другого аперіодичного блока 25, а на вхід «Подільник» другого блока 28 ділення надходить сигнал з виходу четвертого суматора 34, що дорівнює вели-

$$\text{чині } \left[1 + \frac{K_{n1n}pX_1(p)}{(pL_n+r_n)}\right].$$

Таким чином, сигнал на виході другого блока 28 ділення дорівнює величині

$$U_n(p) / \left\{ (pL_n+r_n) \left[1 + \frac{K_{n1n}pX_1(p)}{(pL_n+r_n)}\right] \right\}.$$

Цей сигнал надходить на вхід «Подільник» першого блока 27 ділення, вихідний сигнал якого дорівнює величині

$$U_k^*(p) = \frac{U_k(p)(pL_k+r_k)(pL_n+r_n) \left(1 + \frac{K_{n1n}pX_1(p)}{(pL_n+r_n)}\right)}{U_n(p)}, \quad i$$

надходить на перший вхід першого суматора 7.

Таким чином, сигнал на виході першого суматора 7 дорівнює величині  $U_7(p)$

$$U_7(p) = K_{n1k}U_k(p) + M_1p^2X_1(p) + b_1X_1(p) + c_1X_1(p) + \frac{K_{n1k}^2U_n^2(p)}{(pL_k+r_k)(pL_n+r_n)^2 \left(1 + \frac{K_{n1n}pX_1(p)}{(pL_n+r_n)}\right)^2}$$

Цей сигнал після проходження через другий суматор 8 і підсилювач 9 струму надходить в обмотку 5 збудження рухомої котушки 4, формуючи в обмотці 5 струм, який забезпечує виникнення сили, що діє на рухому котушку 4, жорстко з'єднану з платформою вібратора з жорстко установленим на ній випробуваним об'єктом.

Сигнал з виходу датчика 10 переміщення рухомої платформи вібратора після проходження через блок 12 зворотного зв'язку надходить на другий вхід другого суматора 8, формуючи електромагнітну підвіску рухомої платформи вібратора.

Приймаючи до уваги співвідношення (8), (9), (10), (11) (не враховуючи сигнал зворотного зв'язку для стабілізації статичного положення платформи вібратора, який надходить з виходу датчика 10 переміщення платформи вібратора через блок 12 зворотного зв'язку на другий вхід другого суматора 8), отримуємо таке співвідношення в операційній формі  $R(p)=K_uU_k(p)$ , тобто величина силової дії  $R(p)$  на випробуваний об'єкт пропорційна сигналу  $U_k(p)$  з виходу задавального генератора 6.

При наявності гнучкого зв'язку між платформою вібратора з жорстко установленим на ній випробуваному об'єкті і рухомою котушкою 4 з обмоткою збудження 5 має місце різниця фаз сигналів, що надходять на входи фазового детектора 35 з виходів датчиків 10 і 11 переміщення рухомої платформи і котушки.

На виході фазового детектора 35 формується сигнал, формується також одиничний сигнал на виході знаочутливого елемента 38, який надходить на керувальні входи першого і другого комутаторів 36 і 37 відповідно. В цьому режимі на вихід першого комутатора 36 надходить сигнал  $X_2$  з виходу датчика 11 переміщення рухомої котушки 4 з обмоткою 5 збудження після проходження через третій блок 15 диференціювання і який дорівнює величині  $pX_2$ .

На другий вхід другого комутатора 37 надходить сигнал  $X_2$  з виходу датчика 11 переміщення рухомої котушки вібратора після проходження через перший і другий блоки 15 і 16 диференціювання і шостий підсилювач 22 напруги з коефіцієнтом підсилення  $m_2$ . Таким чином, на виході другого комутатора 37 формується сигнал, що дорівнює величині  $m_2p^2X_2$ .

Таким чином, при наявності гнучкого зв'язку між платформою вібратора і котушкою з обмоткою збудження при формуванні напруги для відтворення заданої силової дії замість сигналу  $b_1pX_1$  з виходу другого комутатора 37 застосовується сигнал  $m_2p^2X_2$ , а замість сигналу  $pX_1$  з виходу першого комутатора 36 застосовується сигнал  $pX_2$ .

В цьому режимі на виході першого блока 27 ділення формується сигнал, що дорівнює величині (в операційній формі)

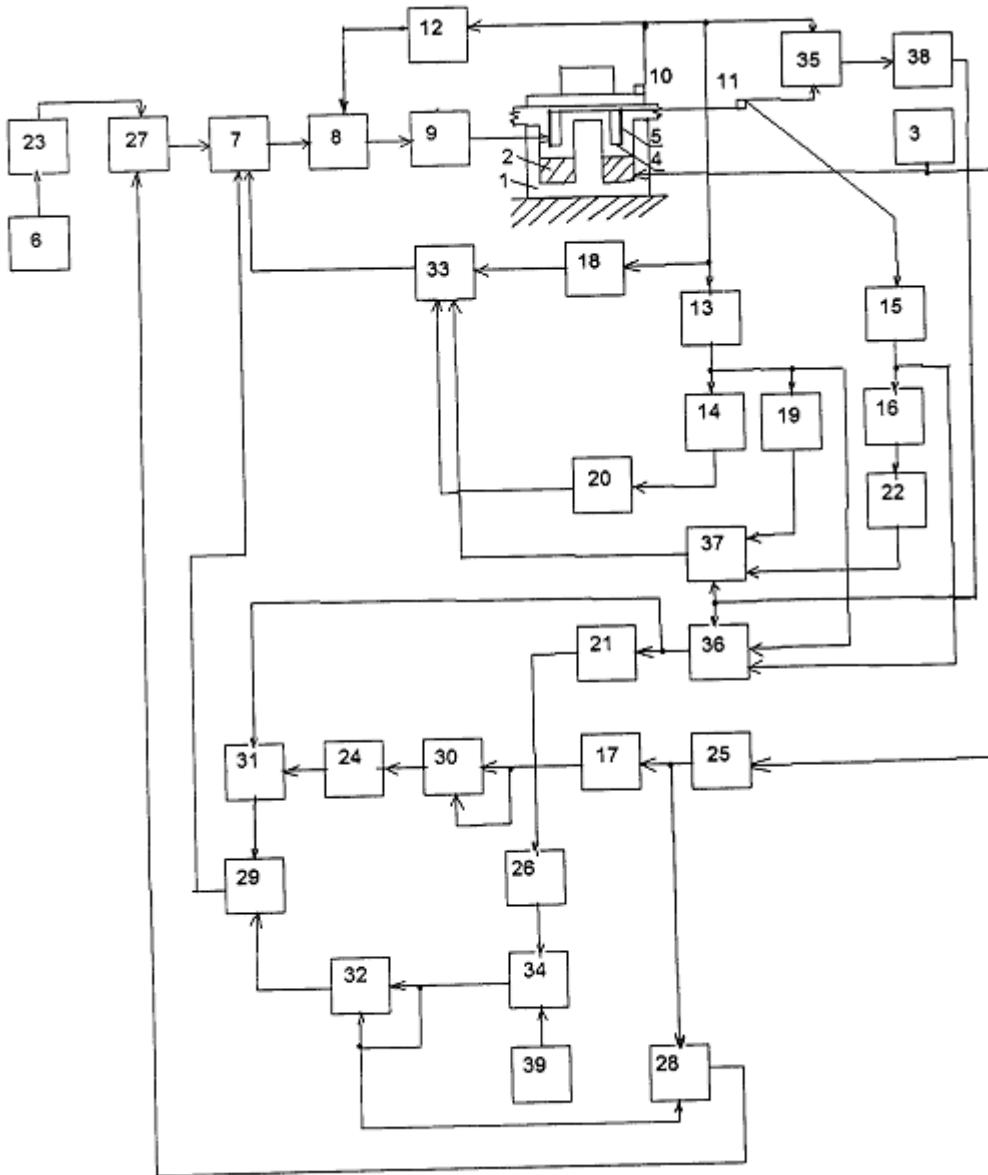


$$U_k^*(p) = U_k(p) \frac{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_{n1n} p X_2}{pL_n + r_n} \right)}{U_n(p)}, \text{ а}$$

на виході першого суматора 7 формується сигнал

$$M_1 p^2 X_1 + m_2 p^2 X_2 + c_1 X_1 - \frac{K_{n1k} U_n U_k}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_{n1n} p X_2}{pL_n + r_n} \right)} + \frac{K_{n1k}^2 U_n^2 p X_2}{(pL_k + r_k)(pL_n + r_n) \left( 1 + \frac{K_{n1n} p X_2}{pL_n + r_n} \right)^2}$$

, що необхідно для формування співвідношення (24), а саме:  $R_1 = K_{n1k} U_k$ .



Фіг.