

Винахід відноситься до антенної техніки і може бути використаний в пристроях розгортки (сканування) променя в просторі.

Найбільш близьким до винаходу по технічній суті є пристрій для коливання допоміжного дзеркала дводзеркальної антени, який містить механізм коливання, що складається зі стойки, шатуна, коромисла, на якому жорстко закріплена антена, і двох кривошипів. Під час пошуку за допомогою слідкуючих електроприводів змінюється в часі кутове положення ведучих кривошипів і завдяки цьому здійснюється коливання дзеркала антени по заданому закону.

Недоліком цього пристрою є мала частота коливання антени в заданому діапазоні кутів, великі енергетичні затрати при коливанні антени та великі маса і габаритні розміри пристрою.

Частота коливання антени в цьому пристрої обмежується постійною часу слідкуючого електроприводу який змінює взаємне положення ведучих кривошипів і працює в режимі реверсів, і може досягати величини 1Гц, при цьому час огляду кадру розміром 30град × 120град складає 15с.

Електродвигун, що забезпечує роботу електропривода, який здійснює обертотворний рух ведучого кривошипа, в слідкуючому режимі, повинен мати велику потужність, що зумовлює великі енергетичні затрати при коливанні антени, а також масу і габаритні розміри пристрою.

В основу винаходу покладено завдання створити такий пристрій для коливання антени, в якому за допомогою компенсатора енергії втрат, використовуючи коливні властивості двомасової механічної системи, яка утворена коромислом з антеною і кривошипом з ротором електричної машини, що з'єднані між собою шатуном за допомогою кінематичних пар, забезпечується виникнення стаціонарних автоколивань і завдяки цьому досягається велика частота коливань антени при малих енергетичних затратах і створюються передумови для зменшення маси і габаритних розмірів пристрою.

Поставлене завдання вирішується тим, що в пристрій для коливання антени, який містить механізм коливання антени, що складається з нерухомої основи, кривошипа, шатуна і коромисла, на якому закріплена антена, при цьому коромисло шарнірами з'єднано з нерухомою основою і першим кінцем шатуна, введено компенсатор енергії втрат, а механізм коливання антени додатково містить шарнірний вузол, за допомогою якого другий кінець шатуна з'єднаний з першим кінцем кривошипа, другий кінець якого з'єднаний з валом компенсатора енергії втрат.

Крім того, шарнірний вузол містить перший і другий ролики, які за допомогою вала з'єднані між собою і з другим кінцем шатуна, нерухому кулачкову шайбу з траєкторним пазом, а перший кінець кривошипа містить радіальний паз, при цьому перший ролик встановлено в траєкторний паз кулачкової шайби, а другий ролик встановлено в радіальний паз кривошипа.

Поряд з цим компенсатор енергії втрат містить синхронну машину, вал якої є вихідним валом компенсатора енергії втрат, давач положення вихідного вала компенсатора енергії втрат, ротор якого механічно з'єднаний з ротором синхронної машини, електронний комутатор, блок перетворення інформації давача положення і цифровий обчислюючий пристрій, який складається

з елемента перетворення координат для синхронної машини, першого і другого елементів перемноження та блока керування, при цьому перша група виходів блока перетворення інформації давача положення з'єднана з обмотками збудження давача положення вихідного вала компенсатора енергії втрат, а його інформаційні обмотки з'єднані з інформаційними входами блока перетворення інформації давача положення, друга група виходів блока перетворення інформації давача положення шиною з'єднана з входом цифрового обчислюючого пристрою, який є входом елемента перетворення координат для синхронної машини та входом блока керування, перший вихід елемента перетворення координат для синхронної машини шиною з'єднаний з першим входом першого елемента перемноження, другий вихід елемента перетворення координат для синхронної машини шиною з'єднаний з першим входом другого елемента перемноження, другі входи першого і другого елементів перемноження шиною з'єднані з виходом блока керування, вихід першого елемента перемноження є першим виходом цифрового обчислюючого пристрою, який шиною з'єднаний з першим входом електронного комутатора, вихід другого елемента перемноження є другим виходом цифрового обчислюючого пристрою, який шиною з'єднаний з другим входом електронного комутатора, виходи якого з'єднані з статорними обмотками синхронної машини.

А блок керування містить елемент формування розрахункової траєкторії власних коливань антени, елемент обчислення траєкторії реальних коливань антени, вхід якого є входом блока керування, суматор і регулятор, вихід якого є виходом блока керування, при цьому вихід елемента формування розрахункової траєкторії власних коливань антени шиною з'єднаний з прямим входом суматора, а інвертуючий вхід суматора шиною з'єднаний з виходом елемента обчислення траєкторії реальних коливань антени, вихід суматора шиною з'єднаний з входом регулятора.

На фіг.1 наведена структура пристрою для коливання антени; на фіг.2 - конструкція шарнірного вузла; на фіг.3 - структура компенсатора енергії втрат; на фіг.4 - структура блока керування; на фіг.5 - варіант структури електронного комутатора і під'єднання його до синхронної машини; на фіг.6 - варіант структури блока перетворення інформації давача положення і під'єднання його до давача положення; на фіг.7 - варіант структури елемента перетворення координат для синхронної машини; на фіг.8 - кінематична схема механізму коливання антени; на фіг.9 - структура двомасової механічної системи; на фіг.10 - структура взаємозв'язків в механізмі коливання антени; на фіг.11 - часові діаграми роботи електронного комутатора; на фіг.12 - графіки траєкторії руху і швидкості антени при постійній довжині кривошипа; на фіг.13 - графіки траєкторії руху і швидкості антени при зміні довжини кривошипа згідно еліптичного закону.

Пристрій для коливання антени (фіг.1), який містить механізм коливання антени, що складається з нерухомої основи 1, коромисла 2, на якому закріплена антена 3. кривошипа 4, шатуна 5 і компенсатора енергії втрат 6. Коромисло 2 з'єднано з нерухомою основою 1 шарніром 7. Перший кінець шатуна 5 шарніром 8 з'єднаний з

коромислом 2, а другий його кінець шарнірним вузлом 9 з'єднаний з першим кінцем кривошипа 4. Другий кінець кривошипа 4 з'єднаний з валом 10, який є вихідним валом компенсатора енергії втрат 6.

Шарнірний вузол 9 (фіг.2) складається з першого 11 і другого 12 роликів, які за допомогою вала 13 з'єднані між собою і з другим кінцем шатуна 5, і нерухомої кулачкової шайби 14 з траєкторним пазом 15. Кривошип 4 має радіальний паз 16. Перший ролик 11 встановлено в траєкторний паз 15 нерухомої кулачкової шайби 14, а другий ролик 12 - в радіальний паз 16 кривошипа 4.

Компенсатор енергії втрат 6 (фіг.3) містить синхронну машину 17, давач положення 19 вихідного вала 10 компенсатора енергії втрат, ротор 20 якого механічно з'єднаний з ротором 18 синхронної машини, електронний комутатор 21, блок 22 перетворення інформації давача положення 19 і цифровий обчислюючий пристрій 23, який складається з елемента 24 перетворення координат для синхронної машини, першого 25 і другого 26 елементів перемноження та блока 27 керування. Обмотки збудження 28 давача положення 19 з'єднані з першою групою виходів блока 22 перетворення інформації давача положення 19, а його інформаційні обмотки 29 з'єднані з інформаційними входами блока 22 перетворення інформації давача положення. Друга група виходів блока 22 перетворення інформації давача положення шиною з'єднана з входом цифрового обчислюючого пристрою 23, який є входом елемента перетворення координат 24 для синхронної машини та входом блока 27 керування.

Перший вихід елемента 24 перетворення координат для синхронної машини шиною з'єднаний з першим входом першого 25 елемента перемноження, другий вихід елемента 24 перетворення координат для синхронної машини шиною з'єднаний з першим входом другого 26 елемента перемноження. Другі входи першого 25 і другого 26 елементів перемноження шиною з'єднані з виходом блока 27 керування. Вихід першого 25 елемента перемноження є першим виходом цифрового обчислюючого пристрою 23, який шиною з'єднаний з першим входом електронного комутатора 21. Вихід другого 26 елемента перемноження є другим виходом цифрового обчислюючого пристрою 23, який шиною з'єднаний з другим входом електронного комутатора 21. Виходи електронного комутатора 21 з'єднані зі статорними обмотками 30 синхронної машини 17.

Блок керування 27 (фіг.4) містить елемент 31 формування розрахункової траєкторії власних коливань антени, елемент 32 обчислення траєкторії реальних коливань антени, вхід якого є входом блока керування 27, суматор 33 і регулятор 34, вихід якого є виходом блока керування 27. Вихід елемента 31 формування розрахункової траєкторії власних коливань антени шиною з'єднаний з прямим входом суматора 33, інвертуючий вхід якого шиною з'єднаний з виходом елемента 32 обчислення траєкторії реальних коливань антени. Вихід суматора 33 шиною з'єднаний з входом регулятора 34.

Електронний комутатор 21 може бути побудованим, наприклад, у відповідності до схеми, наведеної на фіг.5. Електронний комутатор 21 містить генератор 35 тактових імпульсів, елемент 36 формування пилоподібного коду, перший 37 і

другий 38 цифрові компаратори, розподільвач 39 імпульсів, перший 40, другий 41, третій 42 і четвертий 43 транзисторні ключі, кожний з яких складається з першого 44 і другого 45 транзисторів, першого 46 і другого 47 резисторів та діода 48.

Вихід генератора 35 тактових імпульсів з'єднаний з входом елемента 36 формування пилоподібного коду, вихід якого шиною з'єднаний з входами В першого 37 і другого 38 цифрових компараторів. Лінії зв'язку шини першого входу електронного комутатора 21, які несуть інформацію про модуль IN_{ys} і N_{ys} коду управління N_{ys} , з'єднані з входом А першого 37 цифрового компаратора. Лінія зв'язку шини першого входу електронного комутатора 21, яка несе інформацію про знак $sign N_{ys}$ коду управління N_{ys} , з'єднана з другим входом розподільвача 39 імпульсів. Лінії зв'язку шини другого входу електронного комутатора 21, які несуть інформацію про модуль IN_{yc} і коду управління N_{yc} , з'єднані з входом А другого 38 цифрового компаратора. Лінія зв'язку шини другого входу електронного комутатора 21, яка несе інформацію про знак $sign N_{yc}$ коду управління N_{yc} , з'єднана з четвертим входом розподільвача 39 імпульсів. Вихід першого 37 цифрового компаратора з'єднаний з першим входом розподільвача 39 імпульсів, а вихід другого 38 цифрового компаратора з'єднаний з третім входом розподільвача 39 імпульсів. Перший вихід розподільвача 39 імпульсів з'єднаний з входом першого 40 транзисторного ключа, який з'єднаний з базою першого 44 транзистора. Колектор першого 44 транзистора з'єднаний з першим 46 резистором, який з'єднаний з другим 47 резистором і базою другого 45 транзистора. Емітер другого 45 транзистора з'єднаний з другим 47 резистором і з шиною живлення $+U_{ж}$. Емітер першого 44 транзистора з'єднаний з анодом діода 48 і з загальною шиною. Колектор другого 45 транзистора з'єднаний з катодом діода 48 і є виходом транзисторного ключа. Вихід першого 40 транзисторного ключа з'єднаний з входом Н1 першої синусної півобмотки статорної обмотки 30 синхронної машини 17, другий кінець якої з'єднаний з загальною шиною.

Другий вихід розподільвача 39 імпульсів з'єднаний з входом другого 41 транзисторного ключа, вихід якого з'єднаний з входом К2 другої синусної півобмотки 30 синхронної машини 17, другий кінець якої з'єднаний з загальною шиною. Третій вихід розподільвача 39 імпульсів з'єднаний з входом третього 42 транзисторного ключа, вихід якого з'єднаний з входом Н3 першої косинусної півобмотки статорної обмотки 30 синхронної машини 17, другий кінець якої з'єднаний з загальною шиною. Четвертий вихід розподільвача 39 імпульсів з'єднаний з входом четвертого 43 транзисторного ключа, вихід якого з'єднаний з входом К4 другої косинусної півобмотки статорної обмотки 30 синхронної машини 17, другий кінець якої з'єднаний з загальною шиною.

Блок 22 перетворення інформації давача положення 19 може бути побудованим, наприклад, у відповідності до схеми, наведеної на фіг.6. Блок 22 перетворення інформації давача положення містить генератор 49 квадратурних сигналів і перетворювач 50 фаза - код. Генератор 49 квадратурних сигналів складається з генератора 51 імпульсів, першого 52 лічильника, елемента 53

формування синусоїдної залежності, елемента 54 формування косинусоїдної залежності, першого 55 і другого 56 цифроаналогових перетворювачів.

Перетворювач 50 фаза - код складається з першого 57 і другого 58 нуль-органів, другого 59 і третього 60 лічильників і суматора 61.

Вихід генератора 51 з'єднаний з входом першого 52 лічильника, перший вихід якого шиною з'єднаний з входом елемента 53 формування синусоїдної залежності, з входом елемента 54 формування косинусоїдної залежності і з першими входами другого 59 і третього 60 лічильників перетворювача 50 фаза - код. Другий вихід першого 52 лічильника з'єднаний з першими входами першого 57 і другого 58 нуль-органів перетворювача 50 фаза - код. Вихід елемента 53 формування синусоїдної залежності шиною з'єднаний з входом першого 55 цифро-аналогового перетворювача. Вихід елемента 54 формування косинусоїдної залежності шиною з'єднаний з входом другого 56 цифроаналогового перетворювача. Виходи першого 55 і другого 56 цифроаналогових перетворювачів складають першу групу виходів блока 22 перетворення інформації давача положення 19. Другі входи першого 57 і другого 58 нуль-органів складають групу інформаційних входів блока 22 перетворення інформації давача положення 19. Вихід першого 57 нуль-органа з'єднаний з другим входом другого 59 лічильника. Вихід другого 58 нуль-органа з'єднаний з другим входом третього 60 лічильника. Виходи другого 59 і третього 60 лічильників з'єднані відповідно з першим і другим входами суматора 61. Вихід суматора 61 є другою групою виходів блока 22 перетворення інформації давача положення.

Виходи першого 55 і другого 56 цифроаналогових перетворювачів відповідно з'єднані з синусною і косинусною обмотками 28 збудження давача положення 19. Другі входи першого 57 і другого 58 нуль-органів з'єднані відповідно з косинусною і синусною інформаційними 29 обмотками давача положення 19.

Елемент 24 перетворення координат для синхронної машини може бути побудованим, наприклад, у відповідності до структури, наведеної на фіг.7. Елемент 24 перетворення координат містить елемент 62 перемноження, суматор 63, елемент 64 формування синусоїдної залежності, елемент 65 формування косинусоїдної залежності.

Вхід елемента 62 перемноження є входом елемента 24 перетворення координат. Вихід елемента 62 перемноження шиною з'єднаний з першим входом суматора 63, на другий вхід якого поступає код кута θ_k . Вихід суматора 63 з'єднаний з входами елемента 64 формування синусоїдної і елемента 65 формування косинусоїдної залежностей. Вихід елемента 64 формування синусоїдної залежності є першим виходом елемента 24 перетворення координат для синхронної машини. Вихід елемента 65 формування косинусоїдної залежності є другим виходом елемента 24 перетворення координат для синхронної машини.

Схемна реалізація генераторів 35, 51 тактових імпульсів, елементів 25, 26, 62 перемноження, елемента 36 формування пилоподібного коду, цифрових компараторів 37, 38, розподільвача 39 імпульсів, лічильників 52, 59, 60, елементів 53, 64 формування синусоїдної залежності, елементів 54,

65 формування косинусоїдної залежності, цифроаналогових перетворювачів 55, 56, нуль-органів 57, 58, суматорів 33, 61, 63 широко відома і описана в літературі [3 - 6].

Пристрій для коливання антени працює таким чином.

Коромисло 2 (фіг.1) разом з закріпленою на ньому антеною 3, з одного боку, і кривошип 4 з жорстко зв'язаними з ним масами (ротори синхронної машини і давача положення), з другого боку, які за допомогою шатуна 5 і кінематичних пар з'єднані між собою, утворюють двомасову механічну систему, структура якої приведена на фіг.9.

Маса m_1 - це сумарна маса кривошипа 4, ротора 18 синхронної машини 17 і ротора 20 давача положення 19.

Маса m_2 - це сумарна маса коромисла 2 і антени 3.

Масою шатуна 5 можна знехтувати, а кінематичні пари, що з'єднують шатун 5 з коромислом 2 і кривошипом 4 приймаються абсолютно жорсткими.

Особливістю цієї системи є те, що вона перетворює обертовий рух маси m_1 в колильний рух маси m_2 (фіг.9).

Під дією зовнішнього збурюючого моменту в такій механічній системі виникають вимушені коливання, параметри яких визначаються моментами інерції J_k і J_a відповідних мас m_1 і m_2 , а також геометричними розмірами механізму коливання:

$g(\alpha_k)$ - довжина кривошипа 4;

l - довжина шатуна 5;

c - довжина коромисла 2;

d і h - координати положення осі O_1 коливання коромисла 2 і, відповідно, антени 3.

Частота коливань визначається кінетичною енергією, яка накопичена рухомими масами m_1 і m_2 внаслідок дії збурюючого моменту.

Енергетичний баланс такої двомасової механічної системи описується рівнянням

$$W_{ke}(t) = W_k(t) + W_a(t) + Q(t), \quad (1)$$

де $W_{ke}(t)$ - енергія, яка вноситься в систему зовнішнім збурюючим моментом $M_{ke}(t)$ на проміжку часу від 0 до t_1 ;

$W_k(t)$ - кінетична енергія, яка накопичується масою m_1 на проміжку часу від 0 до t_1 ;

$W_a(t)$ - кінетична енергія, яка накопичується масою m_2 на проміжку часу від 0 до t_1 ;

$Q(t)$ - дисипативні втрати енергії (втрати, зумовлені силами тертя в кінематичних парах, тертям повітря та ін.).

Основні складові частини рівняння (1) визначаються за допомогою наступних рівнянь:

$$W_{ke}(t) = \int_0^{t_1} M_{ke}(t) \omega_k(t) dt, \quad (2)$$

де $M_{ke}(t)$ - зовнішній збурюючий момент, прикладений відносно осі обертання кривошипа 4 зі сторони компенсатора енергії втрат 6;

$\omega_k(t)$ - кутова швидкість кривошипа 4.

$$W_k(t) = (1/2) J_k \int_0^{t_1} \omega_k^2(t) dt, \quad (3)$$

де J_k - момент інерції маси m_1 відносно осі обертання кривошипа 4.

$$W_a(t) = (1/2) J_a \int_0^{t_1} \omega_a^2(t) dt, \quad (4)$$

де J_a - момент інерції маси m_2 відносно осі

обертання коромисла 2;

$\omega_a(t)$ - кутова швидкість антени 3.

Коливання в такій двомасовій механічній системі відбуваються за рахунок перерозподілу кінетичних енергій $W_k(t)$ і $W_a(t)$, накопичених відповідно рухомими масами m_1 і m_2 .

В залежності від величини енергії $W_{ke}(t)$, яка вноситься компенсатором енергії втрат 6, двомасова механічна система (механізм коливання антени) може знаходитись в трьох станах.

Перший стан характеризується тим, що на інтервалі часу $\Delta t = t_2 - t_1$ приріст енергії, який вноситься в двомасову механічну систему компенсатором енергії втрат 6,

$$\Delta W_{ke}(t) = \int_{t_1}^{t_2} M_{ke}(t) \omega_k(t) dt$$

більший від енергії дисипативних втрат $Q(t)$.

В цьому стані рухомі маси m_1 і m_2 накопичують кінетичну енергію. Кутові швидкості коромисла 2 - $\omega_a(t)$ і кривошипа 4 - $\omega_k(t)$ зростають. Повна енергія двомасової системи також зростає.

Механізм коливання антени знаходиться в першому стані при переході з меншої частоти коливання антени до більшої.

Другий стан характеризується тим, що на інтервалі часу $\Delta t = t_2 - t_1$ приріст енергії $W_{ke}(t)$ менший ніж енергія $Q(t)$.

Повна енергія двомасової системи в цьому випадку внаслідок дії дисипативних втрат зменшується. Це приводить до зменшення кутових швидкостей коромисла 2 - $\omega_a(t)$ і кривошипа 4 - $\omega_k(t)$. Частота коливань антени 3 також буде зменшуватися.

Механізм коливання антени знаходиться в другому стані при переході з більшої частоти коливання антени до меншої.

Третій стан характеризується тим, що на інтервалі часу $\Delta t = t_2 - t_1$ приріст енергії $W_{ke}(t)$ дорівнює дисипативним втратам енергії $Q(t)$.

Повна енергія двомасової системи в цьому стані не змінюється і дорівнює енергії $W_{пов}(t_1)$, накопиченій рухомими масами m_1 і m_2 на момент часу t_1

$$W_{пов}(t_1) = (1/2)J_k \omega_k^2(t_1) + (1/2)J_a \omega_a^2(t_1) = \text{const}, \quad (5)$$

де $\omega_k(t_1)$ і $\omega_a(t_1)$ - кутові швидкості відповідно кривошипа і антени на момент часу t_1 .

В цьому стані в двомасовій системі встановлюється режим стаціонарних автоколивань, які відбуваються за рахунок перерозподілу повної енергії $W_{пов}(t_1)$, накопиченої двомасовою системою між рухомими масами m_1 і m_2 .

Коливання антени в цьому стані здійснюється з постійною частотою, яка визначається тільки повною енергією, накопиченою двомасовою системою $W_{пов}(t_1)$.

Третій стан двомасової системи відповідає робочому режиму механізму коливання антени.

Таким чином, використовуючи властивість механізму коливання антени продовжувати рух внаслідок перерозподілу енергії між його рухомими масами і здатність компенсатора енергії втрат 6 регулювати величину збурюючого моменту $M_{ke}(t)$ в залежності від фактичних втрат, забезпечуються високі частоти коливання антени при невеликих енергетичних затратах. Енергетичні затрати для підтримання коливань антени з заданою частотою незначні і дорівнюють дисипативним втратам

енергії в механізмі коливання антени.

На фіг.10 показана структура взаємних зв'язків між зовнішнім збурюючим моментом $M_{ke}(t)$ і положенням $[\alpha_k(t), \beta(t)]$ рухомих мас, їх швидкостями $[\omega_k(t), \omega_a(t)]$ та моментами $[M_{ag}(t), M_r(t)]$, які діють в механізмі коливання антени.

На фіг.10 прийняті такі позначення:

$\beta(t)$ - кут повороту антени 3 (коромисла 2);

$\alpha_k(t)$ - кут повороту кривошипа 4;

$\omega_a(t)$ - кутова швидкість антени 3;

$\omega_k(t)$ - кутова швидкість кривошипа 4;

$k(\omega)$ - коефіцієнт тертя;

sign - функція визначення знаку;

$k = \omega_k(t)/\omega_a(t)$ - передаточне відношення;

$M_r(t)$ - момент сил тертя в кінематичних парах;

$M_{ag}(t)$ - динамічний момент антени, приведений до осі обертання кривошипа 4;

$M_{mk}(t)$ - сумарний внутрішній момент механізму коливання антени;

$P = d/dt$ - символ диференціювання;

$f[\alpha_k(t)]$ - залежність між кутом $\beta(t)$ повороту антени 3 (коромисла 2) та кутом $\alpha_k(t)$ повороту кривошипа 4 від геометричних розмірів механізму коливання, яка описується рівнянням:

$$\beta(t) = f[\alpha_k(t)] = \arccos \frac{d^2 + h^2 + q^2 + c^2 - l^2 - 2qdc \cos(\alpha_k(t)) - 2qhs \sin(\alpha_k(t))}{2c \sqrt{d^2 + h^2 + q^2 - 2qdc \cos(\alpha_k(t)) - 2qhs \sin(\alpha_k(t))}}$$

де $q = r[\alpha_k(t)]$ - залежність довжини кривошипа 4 від його кута повороту.

Рух антени 3, який здійснюється механізмом коливання, носить періодичний характер і у відповідності до взаємозв'язків, показаних на фіг.10, описується системою нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} p \omega_k(t) &= (1/J_k)(M_{ke}(t) - M_{mk}(t)); \\ \omega_k(t) &= p \alpha_k(t); \\ M_{mk}(t) &= M_{ag}(t) + M_r(t); \\ M_{ag}(t) &= p J_a k \omega_a(t); \\ M_r(t) &= k(\omega) \text{sign } \omega_a(t); \\ \omega_a(t) &= p \beta(t); \\ \beta(t) &= f[\alpha_k(t)]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Аналіз структури взаємозв'язків в механізмі коливання антени, наведених на фіг.10, і системи рівнянь (7), що описують рух антени 3, показує, що змінюючи момент $M_{ke}(t)$ компенсатора енергії втрат 6 можна встановлювати необхідні режими роботи механізму коливання антени і, таким чином, змінювати частоту коливання антени 6.

Регулювання величини моменту $M_{ke}(t)$ компенсатора енергії втрат 6 здійснюється цифровим обчислюючим пристроєм 23 шляхом регулювання магніторухійної сили статора синхронної машини 17, яка працює в режимі вентильного двигуна.

Вентильний режим роботи синхронної машини 17 дозволяє регулювати її момент в широкому діапазоні з високою частотою.

Цифровий обчислюючий пристрій 23 організовує контур вентильного двигуна, здійснює обробку отриманого сигналу з блоку 22 перетворення інформації давача положення, формує розрахункову траєкторію власних

коливань антени 3, формує керуючий сигнал, який регулює момент синхронної машини 17, і сигнали управління електронним комутатором 21.

Робота синхронної машини 17 в режимі вентильного двигуна забезпечується контуром, що складається з електронного комутатора 21, давача положення 19 вихідного вала 10 компенсатора енергії втрат, блока 22 перетворення інформації давача положення, а також елемента 24 перетворення координат для синхронної машини, першого 25 і другого 26 елементів перемноження, які входять до складу цифрового обчислюючого пристрою 23.

Синхронна машина 17 в режимі вентильного двигуна працює таким чином. Імпульси з частотою f_0 з генератора імпульсів 51 (фіг.6) поступають на перший 52 лічильник, на виходах якого формується циклічний код. Циклічний код утворює часову шкалу перетворення.

Код з виходу першого 52 лічильника поступає на входи елемента 53 формування синусоїдної залежності і елемента 54 формування косинусоїдної залежності. На виходах елементів 53 і 54 формуються коди відповідно синусоїдної і косинусоїдної функцій, які подаються відповідно на перший 55 і другий 56 цифро-аналогові перетворювачі. На виходах першого 55 і другого 56 цифро-аналогових перетворювачів утворюються аналогові синусоїдні напруги рівної амплітуди, які зсунуті по фазі одна відносно одної на 90 ел. градусів: $u_s = A_m \sin \omega_a t$ і $u_c = A_m \cos \omega_a t$, де $\omega_a = 2\pi f_a$, а f_a - частота збудження давача положення 19. Ці напруги поступають на обмотки 28 збудження давача положення 19, на інформаційних обмотках 29 якого утворюються напруги, фаза яких пропорційна куту α_k поворота ротора 20 давача положення: $e_s = E \sin(\omega_a t + \alpha_k)$ і $e_c = E \cos(\omega_a t + \alpha_k)$. Ці напруги поступають на другі входи відповідно першого 57 і другого 58 нуль-органів, на перші входи яких з першого лічильника 52 подаються імпульси з частотою $f_0/2$.

Нуль-органи фіксують часи переходу вхідних синусоїдних сигналів через нульовий рівень. На виходах першого 57 і другого 58 нуль-органів формуються пачки імпульсів з частотою $f_0/2$ тривалістю T_{\sin} і T_{\cos} відповідно. По передньому фронту пачки імпульсів T_{\sin} і T_{\cos} відбувається запис стану часової шкали перетворення відповідно в другий 59 і третій 60 лічильники, які після цього здійснюють підрахунок кількості імпульсів, що знаходяться в пачці T_{\sin} і T_{\cos} відповідно. На виходах другого 59 і третього 60 лічильників формуються відповідно коди N_s і N_c , які визначають фазовий зсув сигналів e_s і e_c відносно часової шкали перетворення. Коди N_s і N_c поступають на входи суматора, на виході якого формується код N_α кутового положення α_k вихідного вала 10 компенсатора енергії втрат 6, який дорівнює $\alpha_k = \omega_k t$, де ω_k - кутова швидкість кривошипа.

Код N_α кутового положення α_k вихідного вала 10 поступає на вхід елемента 24 перетворення координат для синхронної машини (фіг.3), який входить до складу цифрового обчислюючого пристрою 23.

Елемент 24 перетворення координат для синхронної машини формує сигнали керування, які визначають час і послідовність комутації обмоток синхронної машини 17. Тобто, елемент 24 перетворення координат для синхронної машини виконує функції, які покладаються на давач

положення ротора синхронної машини, коли вона працює в вентильному режимі. Структура елемента 24 перетворення координат для синхронної машини визначається кількістю фаз статорної обмотки і схемою їх включення.

На фіг.7 показана структура елемента 24 перетворення координат для двофазової синхронної машини, статорні обмотки якої з'єднані в зірку.

Елемент 62 перемноження узгоджує кількість пар полюсів Z синхронної машини з сигналом давача кутового положення шляхом перемноження коду N_{α_k} на постійне число Z . Код на виході елемента 62 перемноження пропорційний величині $ZN_{\alpha_k} = Z\omega_k t$.

Суматор 63 додає до вихідного кода елемента 62 перемноження код кута комутації θ . Вихідний код суматора 63 поступає на вхід елемента 64 формування синусоїдної і вхід елемента 65 формування косинусоїдної залежностей. На виходах елементів 64 і 65 формуються відповідно коди N_{ks} синусоїдної і N_{kc} косинусоїдної функцій, які рівні

$$\begin{aligned} N_{ks} &= \sin(Z \omega_k t + \theta); \\ N_{kc} &= \cos(Z \omega_k t + \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

Коди N_{ks} і N_{kc} поступають відповідно на перші входи першого 25 і другого 26 елементів перемноження, на другі входи яких поступає код N_p , який сформований блоком керування 27 (фіг.3).

Перший 25 і другий 26 елементи перемноження формують відповідно коди управління N_{ys} і N_{yc} електронним комутатором 21, які описуються рівняннями:

$$\begin{aligned} N_{ys} &= N_p \sin(Z \omega_k t + \theta); \\ N_{yc} &= N_p \cos(Z \omega_k t + \theta). \end{aligned} \quad (9)$$

Коди управління N_{ys} і N_{yc} , які подаються відповідно на перший і другий входи електронного комутатора 21, містять n розрядів модуля кодів $|N_{ys}|$ і $|N_{yc}|$, а також знаковий розряд кодів $\text{sign } N_{ys}$ і $\text{sign } N_{yc}$.

Генератор 35 тактових імпульсів (фіг.5) формує імпульси з частотою f_1 , які поступають на елемент 36 формування пилоподібного коду. Елемент 36 формує пилоподібний код N_{pk} (фіг.11а, 11б), який поступає на входи В першого 37 і другого 38 цифрових компараторів. Модуль коду управління $|N_{ys}|$ (фіг.11а) поступає на вхід А першого 37 цифрового компаратора, а модуль коду управління $|N_{yc}|$ (фіг.11г) поступає на вхід А другого 38 цифрового компаратора.

Перший 37 і другий 38 цифрові компаратори зрівнюють відповідно модулі кодів $|N_{ys}|$ і $|N_{yc}|$ з пилоподібним кодом N_{pk} (фіг.11а, 11г) і формують на своїх виходах широтно-імпульсні сигнали U_1 (фіг.11в) та U_2 (фіг.11е) відповідно. Напруги U_1 і U_2 подаються на розподільвач 39 імпульсів. На розподільвач 39 поступають також сигнали U_3 (фіг.11б) і U_4 (фіг.11д), які несуть інформацію про знаки кодів управління N_{ys} і N_{yc} відповідно, тобто $U_3 = \text{sign } N_{ys}$, $U_4 = \text{sign } N_{yc}$.

Розподільвач 39 імпульсів формує напруги U_5 , U_6 , U_7 і U_8 (фіг.11ж, 11з, 11к, 11л) керування першим 40, другим 41, третім 42 і четвертим 43 транзисторними ключами у відповідності з алгоритмом

$$\left. \begin{aligned} U_5 &= U_1 \& U_3 \\ U_6 &= U_1 \& \bar{U}_3 \\ U_7 &= U_2 \& U_4 \\ U_8 &= U_2 \& \bar{U}_4 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Імпульс напруги U_5 відкриває перший 44 транзистор, який при цьому відкриває другий 45 транзистор першого 40 транзисторного ключа. Другий 45 транзистор в відкритому стані під'єднує початок H_1 першої синусної півобмотки статорної обмотки 30 синхронної машини 17 до шини живлення $+U_{ж}$. Імпульси напруги U_6 , U_7 і U_8 за допомогою ключів 41, 42, 43 під'єднують відповідно кінець K_2 другої синусної півобмотки, початок H_3 першої косинусної півобмотки і кінець K_4 другої косинусної півобмотки статорної обмотки 30 синхронної машини 17 до шини живлення $+U_{ж}$. Струми, які протікають в півобмотках синхронної машини 17 при під'єднанні їх до джерела живлення, утворюють магнітно-рушійну силу статора $F_{ст}$, яка є сумою векторів магнітно-рушійних сил синусної і косинусної обмоток.

Внаслідок взаємодії магнітно-рушійних сил статора $F_{ст}$ і ротора F_p в синхронній машині виникає електромагнітний момент, який дорівнює

$$M = K F_p F_{ст} \sin \theta_k, \quad (11)$$

де K - конструктивний параметр;

θ_k - кут комутації, просторовий кут між векторами магнітно-рушійних сил F_p і $F_{ст}$.

Під дією електромагнітного моменту ротор 18 синхронної машини 17 починає обертатись.

За допомогою суматора 63 (фіг.7) встановлюється такий кут θ , щоб $\theta_k = 90^\circ$ ел. градусам. При цьому електромагнітний момент M синхронної машини відповідно до формули (11) має максимальне значення.

Діод 48 захищає другий 45 транзистор від перенапруги при його закриванні.

Електромагнітний момент M синхронної машини 17 є вихідним моментом компенсатора енергії втрат $M = M_{ке}(t)$, величина якого згідно з рівняннями (9) і (11) регулюється кодом N_p , сформованим блоком керування 27.

Якщо за допомогою блока керування 27 сформувати постійний в часі код $N_p = \text{const}$, при якому синхронна машина 17 розвиває електромагнітний момент $M = M_{ке}(t)$ більший, ніж моменти, які створюються силами тертя в кінематичних парах механізму коливання антени, то ротор 18 і разом з ним кривошип 4 почнуть обертатись.

Механізм коливання антени знаходиться в першому стані, який характеризується зростанням кутових швидкостей кривошипа $\omega_k(t)$ і коромисла $\omega_a(t)$, і, відповідно, частоти коливання антени 3.

Повна енергія рухомих мас механізму коливання також зростає.

При зростанні частоти коливання антени відбувається зростання моментів, які створюються силами тертя в кінематичних парах. Коли моменти сил тертя стануть рівними моменту $M_{ке}(t)$, створеному синхронною машиною 17, механізм коливання антени перейде в третій стан. Коливання антени будуть проходити з постійною частотою, яка визначається тільки повною енергією, накопиченою рухомими масами.

Рух антени, зміна кута повороту β антени в часі $\beta = f(t)$, буде здійснюватись по траєкторії, яка визначається розв'язком системи нелінійних диференціальних рівнянь (7).

При дії на пристрій для коливання антени зовнішніх факторів, таких як температура оточуючого середовища, зміна напруги живлення та інших, відбувається зміна моментів сил тертя та

електромагнітного моменту $M_{ке}(t)$ синхронної машини 17, що призводить до зміни частоти коливання антени 3 і, відповідно, траєкторії її руху.

Створення замкнутої системи регулювання траєкторії руху антени 3 за допомогою блока керування 27, структура якого наведена на фіг.4, дозволяє суттєво зменшити вплив на частоту коливання зовнішніх збурюючих факторів.

Елемент 31 формування розрахункової траєкторії власних коливань антени формує код завдання $N_{вк}$ власної траєкторії руху антени $\beta_{вк} = f(t)$ з бажаною частотою коливань, а елемент 32 обчислення траєкторії реальних коливань антени за допомогою формули (6) формує код $N_{рк}$ дійсної траєкторії руху антени $\beta_g = f(t)$. Суматор 33 порівнює коди $N_{вк}$ і $N_{рк}$ і створює код ΔN невідповідності положення антени її заданому значенню. Регулятор 34 формує код керування N_p , в залежності від величини якого змінюється момент $M_{ке}(t)$ синхронної машини 17.

Коли під дією зовнішніх факторів відбувається зміна траєкторії реальних коливань антени, то змінюється код $N_{рк}$, що призводить до зміни коду N_p і, відповідно, моменту $M_{ке}(t)$. Під дією цього моменту відновлюється траєкторія руху антени $\beta_g = f(t)$ і частота коливань антени набуває попереднього значення.

Елемент 31 формування розрахункової траєкторії власних коливань антени може бути виконаним у вигляді моделі, яка побудована з використанням системи рівнянь (7), що описують процеси в механізмі коливання антени. Модель, розв'язуючи систему рівнянь (7), формує код $N_{вк}$ розрахункової траєкторії власних коливань антени.

Елемент 31 формування розрахункової траєкторії власних коливань антени може бути виконаним у вигляді постійно-запам'ятовуючого пристрою, в якому розрахункова траєкторія власних коливань антени записана у вигляді таблиці.

Траєкторія власних коливань антени визначається конструктивними параметрами механізму коливання ($r(\alpha_k)$, l , c , d , h) і описується системою нелінійних диференціальних рівнянь (7).

На фіг.12 приведений графік траєкторії власних коливань руху антени $\beta_{вк} = f(t)$ (крива 1), графік зміни швидкості $\omega_a = f(t)$ (крива 2) при постійній довжині кривошипа $r = \text{const}$ і графік бажаної (оптимальної) зміни швидкості (крива 3) антени.

Аналіз цих залежностей показує, що характер зміни швидкості значно відрізняється від бажаної (оптимальної) трапецоїдної залежності.

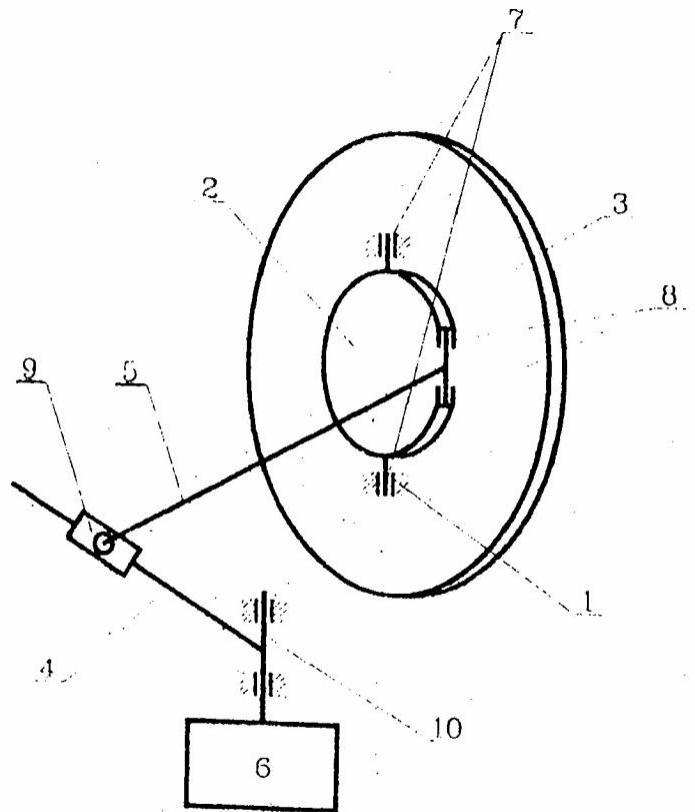
За допомогою шарнірного вузла 9, який введено до складу механізму коливання антени, характер зміни швидкості антени наближається до трапецоїдної залежності за рахунок зміни довжини r_k кривошипа 4 в залежності від його кута поворота α_k . При обертанні кривошипа 4 його довжина змінюється за рахунок одночасного переміщення вала 13 (фіг.2) в радіальному пазі 16 кривошипа 4 і в траєкторному пазі 15 нерухомої кулачкової шайби 14.

На фіг.13 приведені графік траєкторії руху власних коливань $\beta_{вк} = f(t)$ (крива 1), графік зміни швидкості $\omega_a = f(t)$ (крива 2) при еліпсній формі траєкторного пазу 15 і графік оптимальної (трапецоїдної) зміни швидкості (крива 3) антени 3.

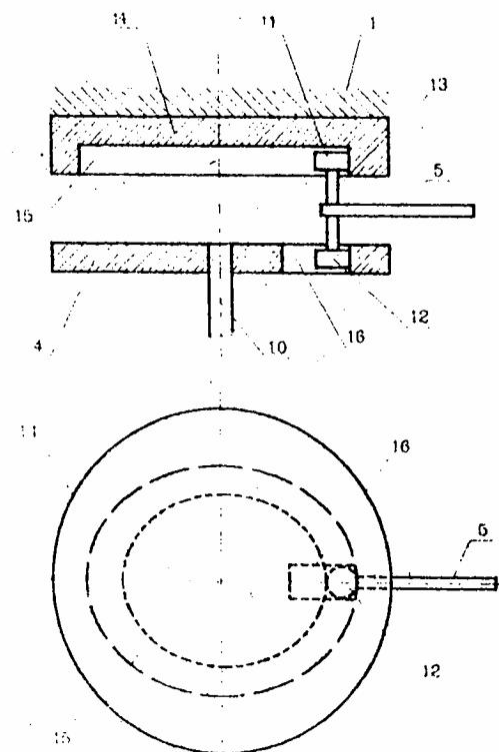
Порівняльний аналіз залежностей, приведених на фіг.12 і фіг.13, між собою показує, що за

допомогою шарнірного вузла 9 вдається наблизити характер зміни швидкості $\omega_a(t)$ до бажаного.

Наведені на фіг.12 і фіг.13 залежності зняті на макеті пристрою для коливання антени, яка має такі параметри: діаметр 300мм і маса 0,25кг. Діапазон кутів коливань антени складає ± 30 кутових градусів при частоті коливань 7,5Гц. Споживана пристроєм для коливання антени потужність становить 5Вт.

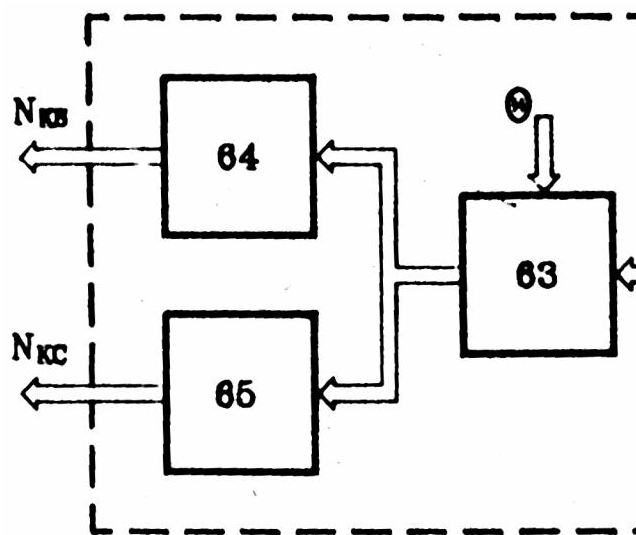


Фіг. 1

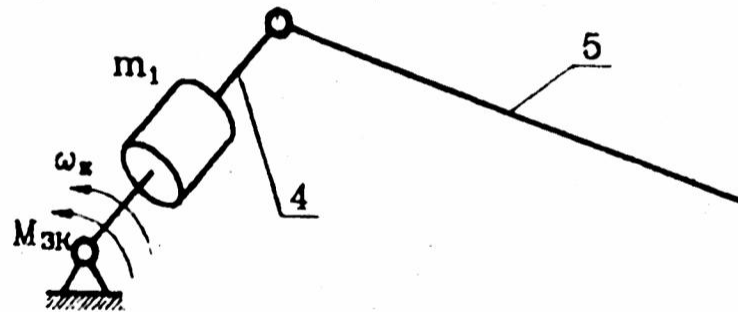


Фіг. 2

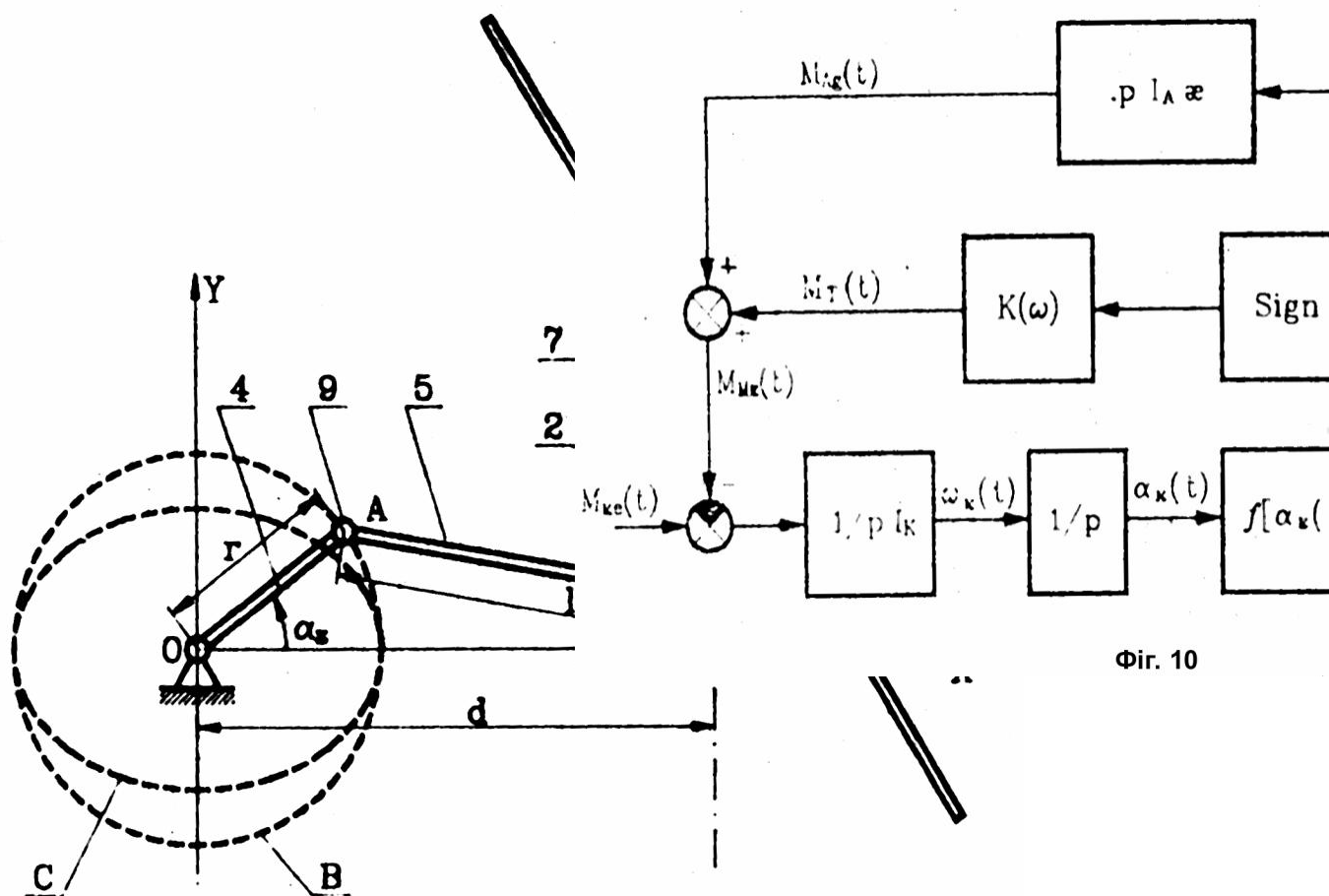




Фиг. 7



Фиг. 9



Фиг. 8

Фиг. 10

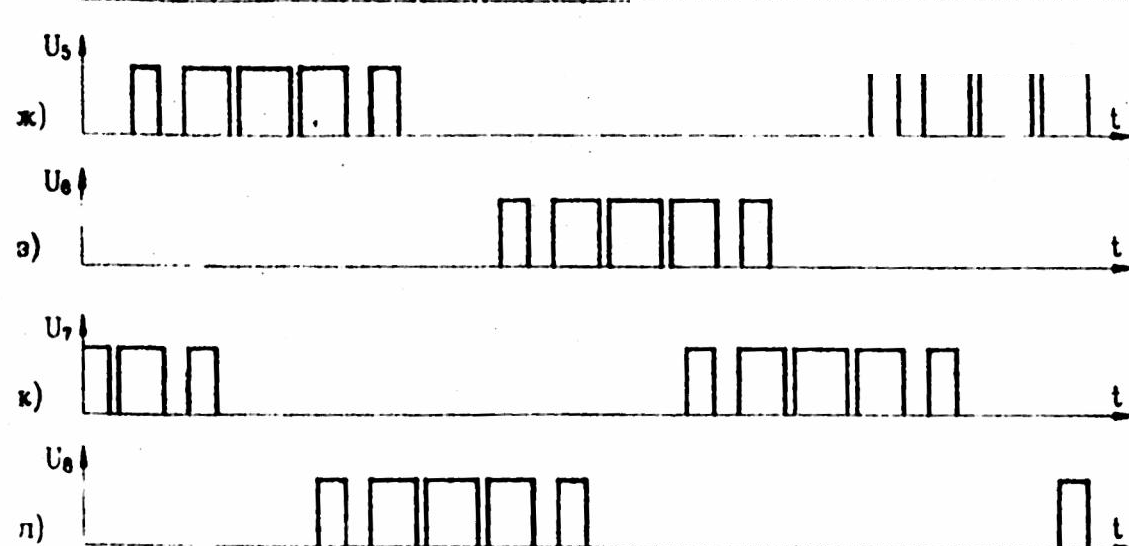
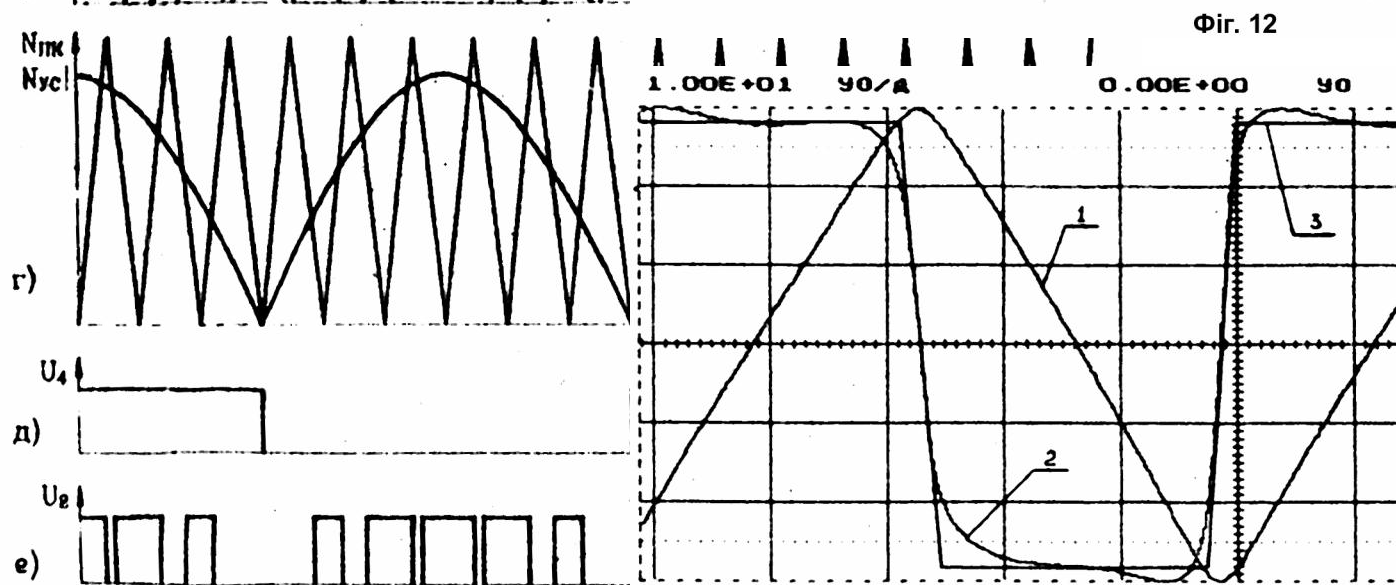
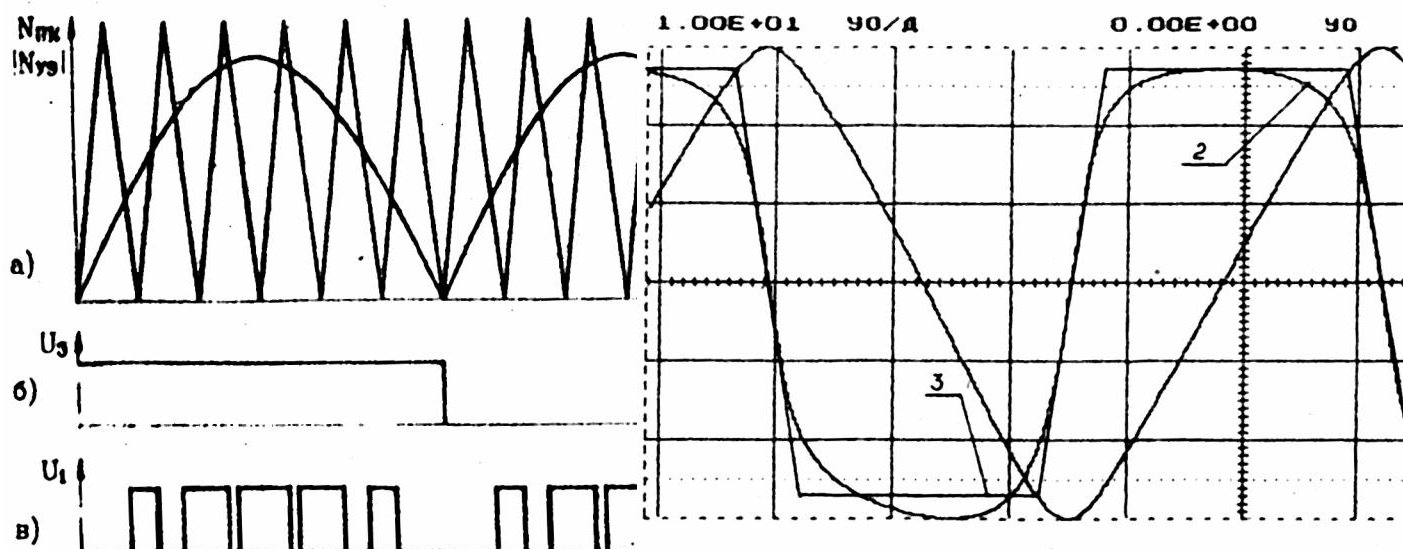


Fig. 11

Fig. 12

Fig. 13