

Контрольна робота №1 по курсу «Гібридні Комп'ютерні Системи»

1. МАСШТАБУВАННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ХАРАКТЕРИСТИКИ $U_2 = F^U(U_1)$

При виконанні контрольної роботи №1 з курсу «ГКС» (див. пп. 8, 9 загальних методичних вказівок, Контрольна робота №1 з курсу «ТПЕ») студент має знати масштабування нелінійних залежностей.

В аналогових ЕОМ залежними фізичними (машинними) змінними є миттєві значення напруги постійного струму, виміряні відносно аналогової землі (землі сигналу)., відповідно до цього залежні математичні змінні x та y відображаються в аналогових ЕОМ відповідно напругам постійного струму U_1 і U_2 , причому математичні (x та y) і машинні (U_1 і U_2) змінні пов'язані між собою простими масштабними співвідношеннями

$$x = M_1 U_1; \quad y = M_2 U_2, \quad (1)$$

де M_1 і M_2 – розмірні масштабні коефіцієнти (одиниця – 1/В), постійні на всьому інтервалі моделювання. Напруга U_2 – вихідна напруга функціонального перетворювача (ФП), а напруга U_1 (вихідна для ФП) – вихідна напруга будь-якого іншого аналогового блоку, до виходу якого при розв'язанні задач підключається ФП. Для запобігання перевантажень або насичення цих блоків, що порушують нормальну і правильну роботу аналогових ЕОМ, значення машинних змінних не повинні за межі лінійного діапазона, обмеженого значеннями $\pm U_{max}$ (± 100 В для АВК-2, МН-7, МН-7 М; ± 10 В для АВК-31; ± 25 В для МН-10М). З іншого боку, бажано, щоб даний лінійний діапазон використовувався за можливістю повністю, оскільки при збільшенні діапазона зміни напруг U_1 і U_2 збільшується співвідношення сигнал/перешкода, а отже і точність.

Тому, хоча масштаби M_1 і M_2 слід обирати на підставі нерівностей, що забезпечують роботу блоків в лінійному діапазоні

$$M_1 \geq \frac{|x|_{max}}{U_{max}}, \quad M_2 \geq \frac{|y|_{max}}{U_{max}}, \quad (2)$$

необхідно прагнути зменшити масштаби для підвищення точності, тобто визначати оптимальні значення масштабів (M_1^* і M_2^*) з рівнянь

$$M_1^* = \frac{|x|_{max}}{U_{max}}, \quad M_2^* = \frac{|y|_{max}}{U_{max}}, \quad (3)$$

де $|x|_{max}$ і $|y|_{max}$ - максимальні за абсолютною величиною значення абсцис і ординат апроксимуючої функції $y = F(x)$.

За оптимальних значень масштабів в нелінійних блоках ФП повністю використовуються вхідний і вихідний діапазони.

Примітка. Оптимальні значення масштабів можна округляти лише в більшу сторону.

Для отримання нелінійних залежностей в машинних змінних $U_2 = F^U(U_1)$ (здійснення масштабування нелінійних залежностей) необхідно в математичні вирази підставити замість математичних змінних x та y їх фізичні еквіваленти з урахуванням масштабів, тобто відповідно $M_1 U_1$ і $M_2 U_2$.

Оскільки M_1 – масштаб вхідної змінної (по осі абсцис), а M_2 – масштаб вихідної змінної (по осі ординат), координати вузлів інтерполяції (вершини апроксимуючої ламаної лінії) в машинних змінних, тобто значення U_{1i} і U_{2i} необхідно визначати за формулами

$$U_{1i} = \frac{x_i}{M_1^{*0}}; \quad U_{2i} = \frac{y_i}{M_2^{*0}}, \quad (4)$$

де M_1^{*0} і M_2^{*0} – округлені значення M_1^* і M_2^* .

Апроксимуюча функція $y = F(x)$ лежить всередині прямокутника $2|x|_{max} \times 2|y|_{max}$ з центром в початку координат, торкаючись щонайменше двох його сторін (при $x_{min} = -x_{max}$ – торкаючись щонайменше трьох сторін). Тому, якщо значення масштабів обирають рівними оптимальним, масштабована залежність $U_2 = F^U(U_1)$ в машинних змінних лежатиме всередині квадрата $2U_{max} \times 2U_{max}$ з центром в початку координат, торкаючись також відповідно двох, трьох або чотирьох сторін цього квадрата.

Примітка. Оскільки значення масштабів округлюють, то $|U_1|_{max}$ і $|U_2|_{max}$ виявляться трохи менше, ніж U_{max} .

Окрім визначення абсцис і ординат вузлів інтерполяції функції $U_2 = F^U(U_1)$ необхідно знайти значення кутових коефіцієнтів всіх лінійних ділянок k_i ($i = \overline{1, n}$), попередньо пронумерувавши вузли та лінійні ділянки в довільному порядку.

Примітка. Вузли та лінійні ділянки нумерують на графіку ламаної лінії $U_2 = F^U(U_1)$ незалежно від того, в якому порядку знаходимо вершини ламаної лінії при апроксимації.

Кутові коефіцієнти легко визначити за формулою

$$k_i = \frac{U_{2i+1} - U_{2i}}{U_{1i+1} - U_{1i}}, \quad (5)$$

де U_{1i} і U_{2i} – координати початкової точки, U_{1i+1} і U_{2i+1} – координати кінцевої точки i -ї лінійної ділянки, що розглядається.

Якщо вузли і ділянки пронумерувати послідовно зліва направо, всі отримані дані зручно записати в табл. 1.

Таблиця 1

Номер вузла	U_{1i}	U_{2i}	k_i	Номер ділянки
1				
2				1
3				2
4				3
...				4
				...
n-1				n-1

п				
---	--	--	--	--

2. ВИБІР СТРУКТУРИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ФП І ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК

При виконанні пп. 10 загальних методичних вказівок (Контрольна робота №1 з курсу «ТПЕ») студенту необхідно ознайомитися зі структурами спеціалізованих ФП та методиками відтворення струмових характеристик.

Однозначні неперервні нелінійні залежності в аналогових ЕОМ моделюються за допомогою універсальних і спеціалізованих ФП. Спеціалізовані ФП використовуються для відтворення конкретної нелінійної залежності. Моделююча характеристика таких спеціалізованих ФП не може бути змінена на відміну від моделюючої характеристики універсальних ФП.

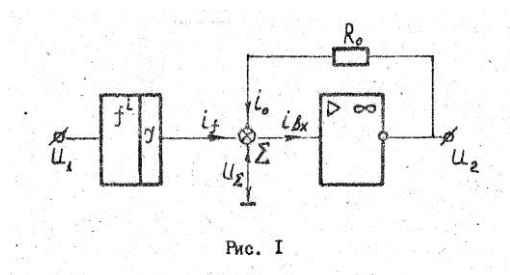
Відомі дві основні структури ФП, що використовуються для моделювання однозначних нелінійних залежностей:

нелінійний операційний підсилювач (НОП) із включенням нелінійних елементів у вхідне коло підсилювача;

НОП із включенням нелінійних елементів у коло зворотного зв'язку підсилювача.

Примітка. Існує й більш складна схема НОП із включенням нелінійних елементів у вхідне коло і в коло зворотного зв'язку підсилювача. Однак при виконанні завдання будемо роздивлятися тільки вказані дві прості структури НОП.

На рис. 1 показана перша структура. НОП складається з підсилювача, в колі зворотного зв'язку якого включений резистор, а у вхідному колі нелінійний вузол з токовим виходом. Опір резистора R_0 , струмова характеристика нелінійного вузла $i_l = f^l(U_l)$. Підсилювач має більший коефіцієнт підсилення, ($k_y \rightarrow \infty$) і тому можна при аналізі схеми знехтувати потенціалом підсумовуючої точки ($U_\Sigma = -U_2/k_y \approx 0$) і вхідною напругою (i_{ex}) підсилювача.



З урахуванням прийнятих припущень

$$U_2 = i_0 R_0 = -i_l R_0 = -R_0 f^l(U_1) = F(U_1) \quad (6)$$

Таким чином, у відповідності з виразом (6) характеристика НОП $U_2 = F(U_1)$ може бути отримана зі струмової характеристики вхідного кола $f^l(U_1)$ збільшенням ординат в R_0 разів та дзеркальним відображенням відносно осі абсцис.

На рис. 2 показаний приклад знаходження характеристики НОП $U_2 = F(U_1)$ за струмовою характеристикою $i_f = f^i(U_1)$. Абсциси будь-яких точок характеристики не змінюються, а ординати та кутові коефіцієнти збільшуються в $-R_0$ разів.

Для вказаного прикладу $U_{21} = -R_0 i_{f1}$; $K_1 = -R_0 b_1^i$; $K_2 = -R_0 b_2^i$, де i_{f1} – рівень насичення на струмовій характеристиці; U_{21} – відповідний йому рівень на характеристиці НОП; b_1^i і b_2^i – кутові коефіцієнти характеристики; $i_f = f^i(U_1)$; K_1 і K_2 – відповідні їм коефіцієнти на характеристиці НОП.

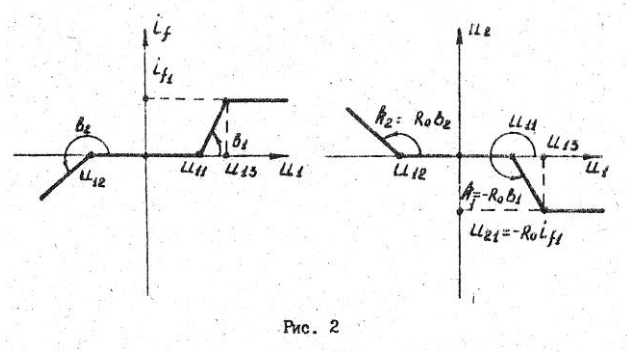


Рис. 2

Для розв'язання задач синтезу, тобто визначення струмової характеристики вхідного кола $i_f = f^i(U_1)$, за характеристикою НОП $U_2 = F(U_1)$, необхідно виконати зворотні операції, тобто взяти дзеркальне відображення характеристики $U_2 = F(U_1)$ відносно осі абсцис і зменшити ординати в R_0 разів.

Друга структура НОП із включенням резистора у вхідне коло підсилювача, а нелінійного вузла з токовим виходом – в коло зворотного зв'язку зображена на рис. 3. Оскільки вхідною напругою для нелінійного вузла є вихідна напруга НОП (U_2), токова характеристика представляє собою залежність вихідного струму даного вузла від цієї напруги, тобто $i_\square = \square^i(U_2)$.

Нехтуючи, як і в попередньому випадку, значеннями U_Σ і i_{e_x} , можна записати наступний вираз:

$$U_1 = i_1 R_1 = -i_\square R_1 = -R_1 \square^i(U_2) = \square_1(U_2) \quad (7)$$

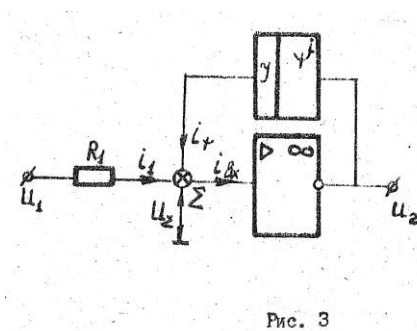


Рис. 3

Якщо одна змінна є деякою функцією другої змінної, то ця змінна в свою чергу є зворотною функцією першої.

Тому, виходячи з рівняння (7), характеристику НОП $U_2 = F(U_1)$ можна отримати як функцію, зворотну $\square$, тобто

$$U_2 = \square_1^{-1}(U_1) = F(U_1), \quad (8)$$

де $\square_1^{-1}$ – функція, зворотна $\square$.

Таким чином, для отримання характеристики НОП $U_2 = F(U_1)$ необхідно виконати наступні операції:

- збільшити ординати струмової характеристики кола зворотного зв'язку $i_{\square} = \square^i(U_2)$ в R_1 разів;
- Взяти дзеркальне відображення відносно осі абсцис, отримавши залежність $U_1 = \square_1(U_2)$;
- Взяти дзеркальне відображення відносно бісектриси $U_1=U_2$ для отримання зворотного зв'язку $U_2 = \square_1^{-1}(U_1)$.

На рис. 4 зображено приклад послідовного виконання вказаних операцій з урахуванням перерахунку параметрів характеристики.

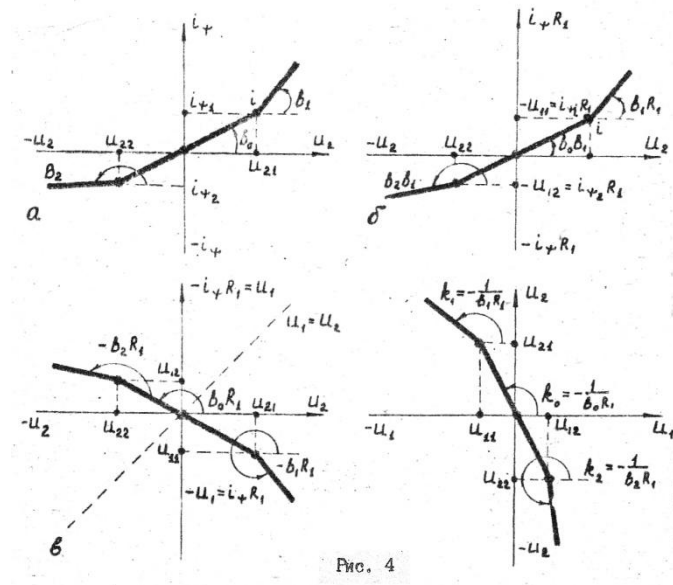


Рис. 4

Кутові коефіцієнти струмової характеристики b_i^i перераховують в кутові коефіцієнти k_i за формулою $K_i = -1/(R_i b_i^i)$, а координати (ординати) $i_{\square i}$ в абсциси U_{1i} – за формулою $U_{1i} = -i_{\square i} R_1$. Абсциси струмової характеристики перетворюються на ординати характеристики НОП.

Можна легко показати, що два розглянутих дзеркальних відображення еквівалентні повороту характеристики на 90° проти годинникової стрілки (порівняй рис. 4, б і рис. 4, а з урахуванням того, що на рис. 4, б $i_{\square} R_1 = -U_1$, а $-i_{\square} R_1 = U_1$).

При розв'язанні задачі синтезу, тобто для відтворення струмової характеристики кола зворотного зв'язку $i_{\square} = \square^i(U_2)$ за заданою характеристикою НОП $U_2 = F(U_1)$ необхідно повернути характеристику НОП за годинниковою стрілкою на 90° і зменшити ординати в R_1 разів.

Для забезпечення стійкої роботи НОП з нелінійними елементами в колі зворотного зв'язку необхідно, щоб у схемі існував від'ємний зворотний зв'язок.

Умова наявності в схемі від'ємного зворотного зв'язку має вигляд

$$\frac{\partial i_{\psi}}{\partial U_2} \geq 0, \quad (9)$$

Оскільки підсилювач завжди інвертує сигнал. Це означає, що струмова характеристика $i_{\square} = \square^i(U_2)$ не може мати від'ємних кутових коефіцієнтів.

Якщо отримана при синтезі схеми НОП струмова характеристика кола зворотного зв'язку має від'ємні кутові коефіцієнти, це означає, що другу структуру із включенням нелінійних елементів до кола зворотного зв'язку для моделювання конкретної нелінійної залежності використовувати не можна.

3. РОЗКЛАДАННЯ СТРУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ДОДАНКИ І РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

При виконанні п. 11 загальних методичних вказівок (Контрольна робота №1 з курсу «ТПЕ») студенту необхідно вивчити методику розкладання ламаних ліній на елементарні доданки. Для вибору оптимального варіанта розрахунку параметрів доданків доцільно знати наступний матеріал.

Аналітична форма запису апроксимуючої ламаної лінії $y=F(x)$ може бути представлена у вигляді

$$y = F(x) = F(x_0) + \sum_{s=0}^n F_s(x), \quad (10)$$

де x_0 – абсциса початкової точки, починаючи з якої узагальнена інтерполяційна формула Ньютона на всю ламану лінію; $F(x_0)$ – постійне значення (ордината початкової точки); $F_s(x)$ – s-а елементарна нелінійна характеристика (лінійна з обмеженням на нульовому рівні вихідного параметра).

Елементарна нелінійна характеристика представляє собою лінійну за формою залежність вигляду

$$y = F_s(x) = b_{i,i-1}^i(x-x_i), \quad (11)$$

де x_i – початкова точка лінійної ділянки, що розглядається; $b_{i,i-1}^i$ – коефіцієнт, на який накладаються наступні обмеження:

$$b_{i,i-1}^i = \begin{cases} 0 \text{ при } x \leq x_i \\ b_i - b_{i-1} = B_i = \text{const при } x \geq x_i \end{cases}; \quad (12)$$

$$b_{i,i-1}^i = \begin{cases} 0 \text{ при } x \geq x_i \\ b_i - b_{i-1} = B_i = \text{const при } x \leq x_i \end{cases}; \quad (13)$$

Обмеження (12) діє для правої гілки ламаної лінії, тобто для частини ламаної, розміщеної справа від обраної початкової точки ($x \geq x_0$), обмеження (13) – для лівої гілки ($x \leq x_0$).

В формулах для $b_{i,i-1}^i$ значення b_i та b_{i-1} – кутові коефіцієнти розглянутої (i) та попередньої (i-1) ділянок. Для правої гілки попередня ділянка розміщена зліва від розглянутої, для лівої – справа.

Для першої нелінійної ділянки правої гілки – першої від початкової точки x_0 , $F(x_0)$ попередня ділянка – горизонтальна лінія $F(x_0)$, що має кутовий коефіцієнт, рівний нулю, тому $B_{i-1} = b_0 - b_{i-1} = b_{i-1}$.

Якщо початкова точка x_0 , $F(x_0)$ не співпадає з однією з вершин ламаної лінії, а розміщена всередині лінійної ділянки, то $B_m = b_m^i - b_0^i = B_0$ і дві елементарні нелінійні залежності $F_0(x)$ і $F_m(x)$, що мають обмеження в різні сторони від точки x_0 , можна замінити однією лінійною. Залежністю без обмежень:

$$F_0(x) = b_0^i(x-x_0). \quad (14)$$

Примітка. Якщо початкова точка x_0 , $F(x_0)$ є вершиною ламаної лінії і $B_m = b_m^i \neq b_0^i = B_0$, то характеристику $F_0(x)$ також можна вибрати лінійною; але в цьому разі для першої лінійної ділянки лівої гілки кутовий коефіцієнт $B_m = b_m^i - b_0^i$, оскільки попередня ділянка – лінійна з кутовим коефіцієнтом b_0^i .

Відповідно до (10) ламану лінію завжди можна представити у вигляді суми елементарних характеристик: постійної $F(x_0)$ та елементарних нелінійних $F_s(x)$ ($s=1, n$), з яких одна $F_0(x)$ може бути і лінійною.

Оскільки початкова точка x_0 , $F(x_0)$ може бути вибрана довільно ($x_{min} \leq x \leq x_{max}$), для однієї і тієї ж апроксимуючої функції $F(x)$ можна отримати різні математичні описи, а отже, виконати різні варіанти розкладань на доданки (елементарні характеристики).

Найчастіше в якості початкової точки обирають точку 0, $F(0)$. При цьому

$$y = F(x) = F(0) + \sum_{s=1}^n F_s(x), \quad (15)$$

або

$$y = F(x) = F(0) + b_0^i \sum_{s=1}^n F_s(x), \quad (16)$$

причому (16) відповідає випадку, коли використовується лінійна характеристика $F_0(x) = b_0^i x$.

На рис. 5 показано приклад розкладання ламаної лінії $F(x)$ на доданки у випадку, коли в якості початкової точки вибрана точка з абсцисою $x_0=0$.

При цьому перший доданок – постійна величина $F(0)$ (так зване «початкове значення функції»); другий – лінійна залежність $F_0(x) = b_0^i x$ («початковий нахил»), а інші доданки – елементарні нелінійні характеристики. Розкладання відповідає формулі (16).

Якщо в якості початкової точки обирається точка $x_0=x_{min}$, $F(x_{min})$, то на коефіцієнти $b_{i,i-1}^i$ накладатимуться лише обмеження вигляду (12), оскільки завжди $x \geq x_0$.

Приклад розкладання на доданки $y=F(x)$ для $x_0 = x_{min} = x_5$ показаний на рис. 6, причому перший доданок – постійна величина $F(x_5)$, другий доданок вибраний лінійним $F_0(x) = b_4^i(x-x_5)$, а решта доданків – елементарні нелінійні характеристики.

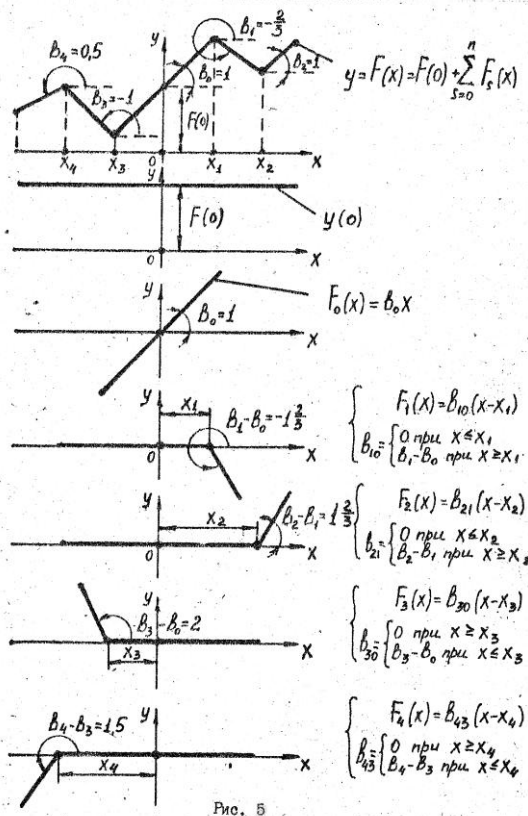


Рис. 5

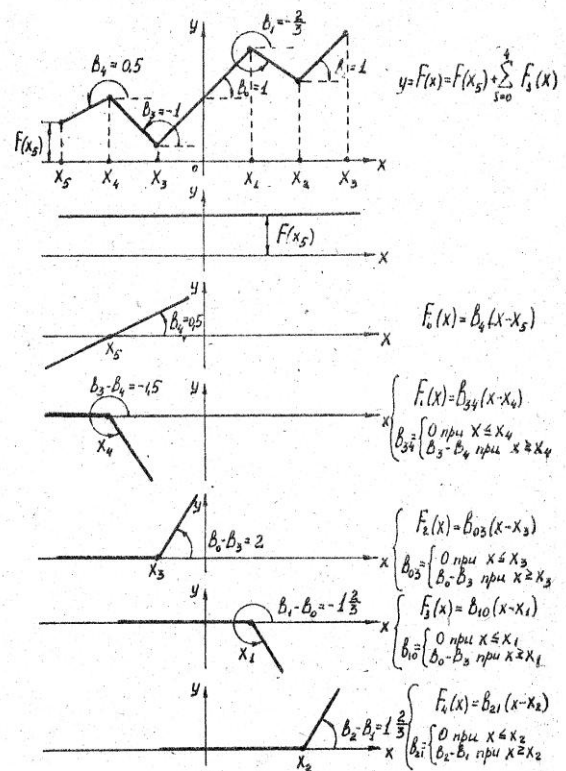


Рис. 6

Примітка. Оскільки зліва від точки x_5 , $F(x_5)$ функція не задана, замість лінійної характеристики $F_0(x) = b_{10}^i(x-x_5)$ в якості другого доданку може бути вибрана елементарна нелінійна характеристика $F_0(x) = b_{45}^i(x-x_5)$, де

$$b_{45} = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq x_5 \\ b_4, & \text{при } x \geq x_5 \end{cases}$$

При цьому зліва від точки x_5 , $F(x_5)$ функція $F(x)$ матиме горизонтальну ділянку, на відміну від попереднього випадку (рис. 6), де $F(x)$ має зліва від точки x_5 , $F(x_5)$ лінійну характеристику з кутовим коефіцієнтом b_4 (продовження лінійної ділянки x_4-x_5).

На рис. 7 зображено розкладання тієї ж характеристики $y=F(x)$ за умови, що в якості початкової точки вибрана точка з абсцисою $x_0=x_{\max}=x_6$. В цьому разі на коефіцієнти $b_{i,i-1}^i$ накладаються обмеження лише одного виду (13). Так само, як і в минулому випадку, другий доданок $F_0(x)$ може бути вибране також елементарним нелінійним.

Для того, щоб розрізняти елементарні характеристики, для таких характеристик вводяться поняття «квадрант» і «режим».

Квадрант характеристики визначається за кутом нахилу лінійної ділянки характеристики. Кут відраховується від додатного напрямку осі абсцис проти часової стрілки до «зустрічі» з лінійною ділянкою характеристики $F_s(x)$.

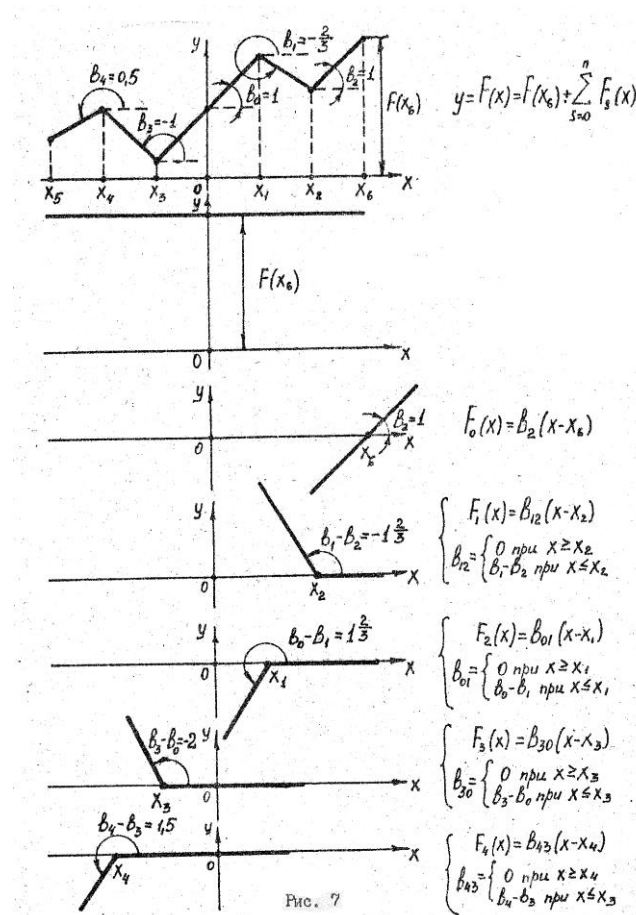
Якщо кут знаходиться в межах $0 \dots 90^\circ$, квадрант характеристики – перший (I); $90 \dots 180^\circ$ – другий (II); $180 \dots 270^\circ$ – третій (III); $270 \dots 360^\circ$ – четвертий (IV).

Наприклад, перший квадрант має четвертий доданок на рис. 5 і четвертий та шостий доданок на рис. 6. Другий квадрант – п'ятий доданок на рис. 5 і третій та п'ятий – на рис. 7. Третій квадрант – шостий доданок на рис. 5 і четвертий та шостий – на рис. 7. Четвертий квадрант має третій

доданок на рис. 5 і третій та п'ятий – на рис. 6. При розгляданні елементарних нелінійних характеристик говорять про режим роботи «на відчинення» та «на зачинення», маючи на увазі при цьому режим роботи нелінійного елемента, що має таку характеристику.

Якщо при вхідному сигналі, рівному нулю, а вихідний сигнал елемента дорівнює нулю, вважається, що у вихідному стані елемент зачинений і працюватиме «на відчинення».

Отже, якщо при $x=0$ $F_s(x)$ також дорівнюватиме нулю, «режим» характеристики $F_s(x)$ – «на відчинення». Якщо при $x=0$ $F_s(x) \neq 0$, характеристика $F_s(x)$ – «на зачинення».



Наприклад, всі нелінійні характеристики, зображені на рис. 5, та дві останні нелінійні характеристики на рис. 6 і 7 – «на відчинення». Решта нелінійних характеристик (дві перші нелінійні на рис. 6 і 7) – «на зачинення».

Цікаво зазначити, що при розкладанні від точки 0, $F(0)$ завжди використовуються нелінійні характеристики «на відчинення»; при розкладанні від точки $x_0=x_{\min}$, $F(x_0)$ використовуються характеристики лише I або IV квадранта, а при розкладанні від точки $x_0=x_{\max}$, $F(x_0)$ – II або III квадранта.

При розкладанні правої гілки характеристики ($x \geq x_0$) виходять елементарні нелінійні характеристики тільки I або IV квадранта, а при розкладання лівої – II або III квадранта.

Елементарні нелінійні характеристики I і III квадрантів мають додатні кутові коефіцієнти $B_i = b_i - b_{i-1} > 0$, а характеристики II та IV квадрантів – від'ємні кутові коефіцієнти $B_i = b_i - b_{i-1} < 0$.

Якщо відомі координати вершин апроксимуючої функції $y = F(x)$, то для кожної лінійної ділянки ламаної лінії можна легко визначити кутовий коефіцієнт b_i^i . Всі необхідні параметри лінійних (постійне значення $F(x_0)$) або початкове значення $F(0)$ та лінійний або початковий нахил b_0^i) та нелінійних (кутові коефіцієнти $B_i = b_i^i - b_{i-1}^i$ і так звані «обмеження по X» - x_i) доданків можуть бути легко визначені за приведеними раніше формулами.

Таким чином, отримані струмові характеристики вхідного кола $i_f = f^i(U_1)$ для першої структури НОП і кола зворотного зв'язку $i_{\Psi} = \Psi^i(U_2)$ для другої структури НОП, що мають вигляд ламаної лінії, можна розкласти на доданки та розрахувати параметри елементарних струмових характеристик $i_{f1} = f_s^i(U_1)$ або $i_{\Psi s} = \Psi_s^i(U_2)$ ($s = \overline{0, n}$), а також постійне значення $i_{fc} = f_s^i(U_{10})$ або $i_{\Psi c} = \Psi_s^i(U_{20})$, де U_{10} , $f^i(U_{10})$ або U_{20} , $\Psi^i(U_{20})$ – вибрана початкова точка для розкладання. Для отримання оптимальної схеми ФП початкова точка повинна бути обрана таким чином, щоб елементарні струмові характеристики мали додатні кутові коефіцієнти (I або III квадрант для нелінійних характеристик).

Отже, необхідно проаналізувати розкладання струмових характеристик i_f і i_{Ψ} та знайти вказаний оптимальний варіант розкладання. Якщо оптимальний варіант знайдено, для нього виконуються всі подальші розрахунки.

Примітка. Якщо такого варіанта розкладання не існує, початкову точку і структуру НОП вибирають довільно.

4. СКЛАДАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ФП

Перед тим як приступити до складання функціональної схеми ФП, студент має знати, яким чином реалізуються практично нелінійні вузли зі струмовим виходом, підключені до вхідного кола НОП (див. рис. 1) або в коло зворотного зв'язку (див. рис. 3). На рис. 8 показана внутрішня структура нелінійного вузла, що підключається у вхідне коло НОП. Такий нелінійний вузол складається з паралельно з'єднаних нелінійних елементів зі струмовими виходами. Вихідні струми нелінійних елементів i_{fs} ($s = \overline{1, n}$) підсумовуються за допомогою суматора струмів паралельного типу (рис. 8), тобто

$$I_f = \sum_{s=1}^n i_{fs} \quad (17)$$

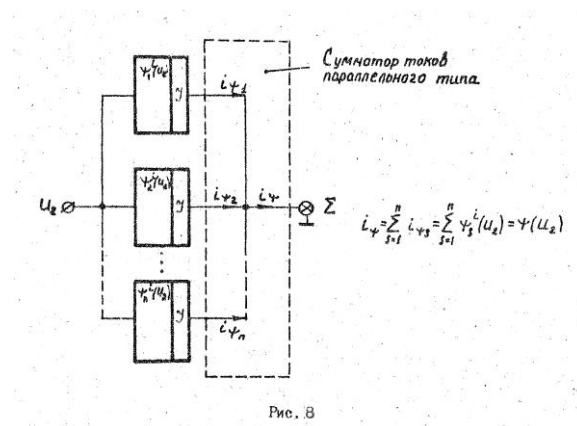


Рис. 8

Якщо відомі струмові характеристики нелінійних елементів, тобто залежності $i_{fs} = f_s^i(U_1)$ ($s = \overline{1, n}$), результуюча струмова характеристика для схеми нелінійного вузла в цілому, тобто залежність $i_f = f^i(U_1)$, може бути отримана простим підсумовуванням струмових характеристик паралельно з'єднаних елементів, оскільки у відповідності з (17)

$$i_f = \sum_{s=1}^n i_{fs} = \sum_{s=1}^n f_s^i(U_1) = f^i(U_1) \quad (18)$$

Аналогічно для схеми функціонального вузла, що включається в коло зворотного зв'язку НОП (рис. 9), результуюча струмова характеристика $i_\Psi = \Psi^i(U_2)$ може бути отримана підсумовуванням струмових характеристик паралельно з'єднаних елементів, оскільки

$$i_\Psi = \sum_{s=1}^n i_{\Psi s} = \sum_{s=1}^n \Psi_s^i(U_2) = \Psi^i(U_2) \quad (19)$$

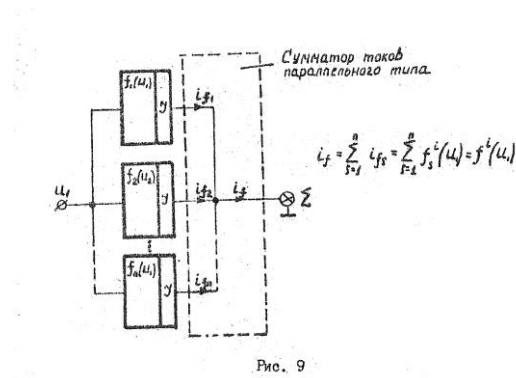


Рис. 9

Отже, якщо відомо розкладання струмової характеристики нелінійного вузла $i_f = f^i(U_1)$ або $\Psi^i(U_2)$ на доданки, технічна реалізація являє собою паралельне з'єднання елементів, моделюючих характеристики доданків $f_s^i(U_1)$ або $\Psi_s^i(U_2)$.

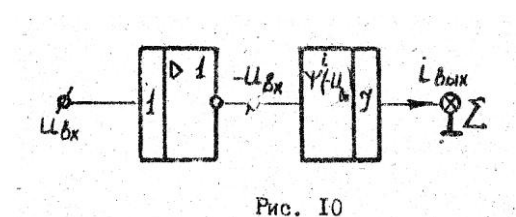
Використовуючи такий принцип і маючи розкладання струмової характеристики на доданки (див. розд. 3), можна легко скласти структурну схему спеціалізованого ФП, що представляє собою НОП, до вхідного кола або до кола зворотного зв'язку якого паралельно включені лінійні та нелінійні елементи зі струмовим виходом, кількість та характеристики яких відповідають вибраному варіанту розкладання.

Примітка. Якщо нелінійні елементи включені у вхідне коло, то в коло зворотного зв'язку повинен бути включений резистор R_0 ; якщо нелінійні елементи включені у коло зворотного зв'язку, то у вхідне коло – резистор R_1 .

При складанні структурної схеми слід враховувати ту обставину, що струмові елементарні нелінійні характеристики I і III квадрантів ($B_i > 0$) і нелінійна характеристика з додатним кутовим коефіцієнтом ($b_0^i > 0$) відтворюються безпосередньо пасивними аналоговими елементами (відповідно нелінійним та лінійним).

Розглянемо, яким чином відтворюються характеристики з від'ємними кутовими коефіцієнтами ($b_0^i < 0$ і $B_i < 0$).

На рис. 10 зображена схема, що складається з елемента зі струмовим виходом (лінійного або нелінійного), до входу якого підключений інвертор.



Якщо відома струмока характеристика елемента $i_{\text{вих}} = \Psi^i(-U_{\text{вх}})$ (залежність вихідного струму елемента від його вхідної напруги), струмова характеристика всієї схеми $i_{\text{вих}} = \Psi^i(U_{\text{вх}})$ може бути отримана дзеркальним відображенням вихідної характеристики відносно осі ординат. Приклад відображення показаний на рис. 11. При цьому змінюються знаки кутових коефіцієнтів на протилежні.

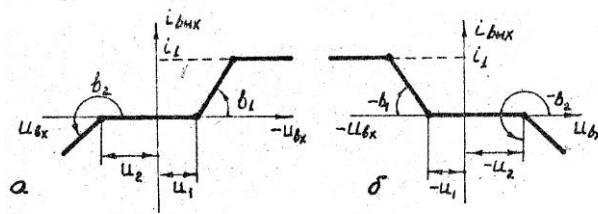


Рис. 11

Таким чином, якщо необхідно отримати лінійну характеристику з від'ємним кутовим коефіцієнтом $b_0^i < 0$, необхідно використати лінійний елемент, що моделює лінійну характеристику з додатним кутовим коефіцієнтом, рівним $-b_0^i > 0$, до входу якого підключити інвертор.

Примітка. Для елементів, включених у вхідне коло НОП, цей додатковий інвертор може бути не показаний, а на вході відповідного елемента роблять напис $-U_1$.

Елементарні нелінійні характеристики II і IV квадрантів моделюються аналогічно елементам I та III квадрантів відповідно до інвертування вхідної напруги елемента.

Отже, функціональна схема має бути побудована таким чином, щоб всі струмові характеристики, умовно зображені всередині елементів з написом $f_s^i(U_1)$ або $\Psi_s^i(U_2)$, мали додатні кутові коефіцієнти ($b_0^i > 0$, I та III квадранти). Звичайно, перед входами деяких елементів можуть бути включені інвертори (умовно або безпосередньо).

В цьому і полягає відміна елементарних характеристик, зображених на елементах схеми ФП, від відповідних характеристик доданків розкладання.

5. ПОБУДОВА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ФП І РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНИХ ТА ДІОДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Для виконання заключної частини контрольної роботи (пп. 14 і 15 загальних методичних вказівок, Контрольна робота №1 з курсу «ТПЕ») студент має вивчити склад і методику заповнення карти налаштування ДУФП.

Для того, щоб виконати перехід від функціональної електричної схеми ФП до схеми електричної принципової, необхідно розглянути принципові схеми лінійних та нелінійних елементів зі струмовим виходом, що моделюють лінійні та елементарні нелінійні характеристики.

Постійне або початкове значення $i_{\text{вх}} = f^i(U_{10})$ або $i_{\text{вх}} = \Psi^i(U_{20})$ моделюється за допомогою лінійного елемента (резистора r_c), до входу якого підключене джерело постійної напруги $E_{0\text{п}}$. в залежності від потрібної полярності струму обирається полярність $E_{0\text{п}}$ ($+E_0$ або $-E_0$).

На рис. 12, а зображена принципова електрична схема такого лінійного елемента, причому вихідний струм $i_{\text{вих}} \in i_{\text{fc}}$ або $i_{\text{вх}}$ залежно від того, де включається елемент: у вхідному колі або у

колі зворотного зв'язку НОП. Характеристики елемента для $E_{0п} = +E_0$ і $E_{0п} = -E_0$ показані відповідно на рис. 12, б і в. значення i_c визначається за формулою

$$i_c = E_{0п}/r_c, \quad (20)$$

де $E_{0п} = +E_0$ або $E_{0п} = -E_0$.

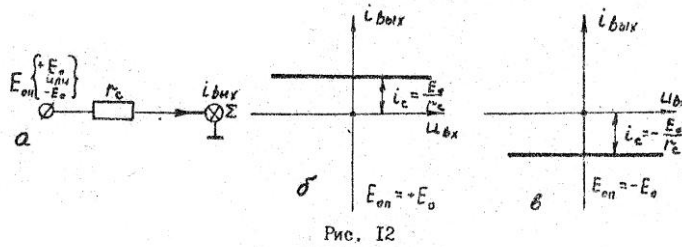


Рис. 12

Для моделювання початкового нахилу (лінійної характеристики з додатнім кутовим коефіцієнтом b_0^i) використовується лінійний елемент (рис. 13, а), характеристика якого показана на рис. 13, б.

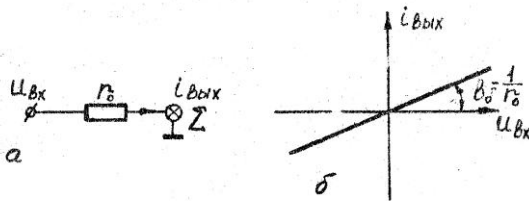


Рис. 13

Залежно від обраної структури НОП вхідна напруга $U_{вх}$ є U_1 (перша структура) або U_2 (друга структура), а вихідний струм $i_{вх}$ – відповідно i_0 або $i_{т0}$. Кутовий коефіцієнт b_0^i пов'язаний з опором r_0 резистора простим співвідношенням:

$$b_0^i = 1/r_0. \quad (21)$$

Для отримання лінійної характеристики з від'ємним кутовим коефіцієнтом використовується підключення інвертора до входу лінійного елемента (на рис. 14, а вхідна напруга $-U_{вх}$). Характеристика такого елемента зображена на рис. 14, б, причому

$$b_0^i = -1/r_0. \quad (22)$$

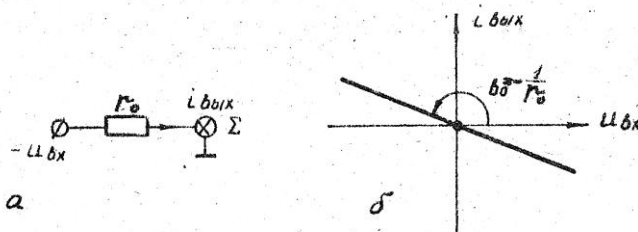


Рис. 14

Моделювання лінійної характеристики з додатнім кутовим коефіцієнтом b_0^i та зміщеною відносно початку координат вправо (рис. 15, а) або вліво (рис. 15, б) виконується за допомогою трьохполюсного лінійного елемента (рис. 15, а).

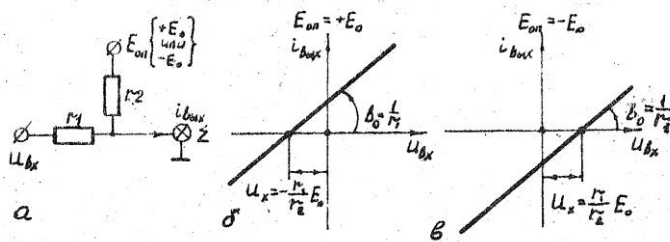


Рис. 15

В загальному випадку в трьох гілках трьохполюсного елемента (вхідній, вихідній та колі зміщення) можуть включатися резистори відповідно r_1 , r_3 та r_2 . Для спеціалізованих ФП звичайно використовується більш проста для розрахунків схема, в якій $r_3=0$.

Значення кутового коефіцієнта b_0^i і зміщення по осі абсцис U_x , яке відображає значення x_0 , визначаються за формулами

$$b_0^i = 1/r_1; \quad (23)$$

$$U_x = (-E_{0n})r_1/r_2, \quad (24)$$

Причому в залежності від потрібного знаку U_x вибирається $E_{0n} = +E_0$ або $E_{0n} = -E_0$.

Якщо треба отримати лінійну характеристику з від'ємним кутовим коефіцієнтом b_0^i (рис. 16, б,в), необхідно використати лінійний елемент з інвертором на вході (рис. 16, а). для такої схеми розрахункові співвідношення мають вигляд

$$b_0^i = -1/r_1; \quad (25)$$

$$U_x = E_{0n} r_1/r_2, \quad (26)$$

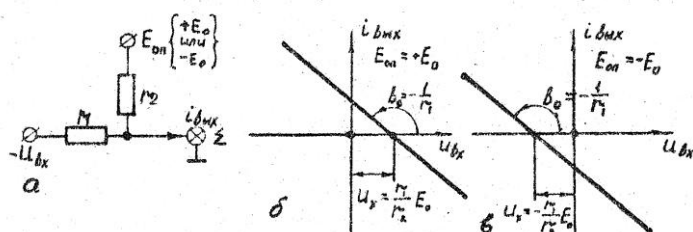


Рис. 16

Елементарні нелінійні характеристики моделюються за допомогою трьохполюсних діючих елементів (ДЕ), що відрізняються від лінійних елементів тим, що у вихідному колі включений діод в прямому або зворотному напрямі (відповідно рис. 17, а, 18, а).

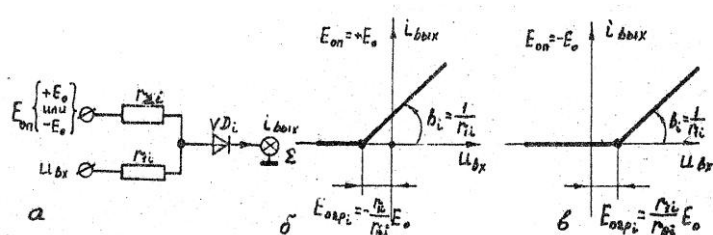


Рис. 17

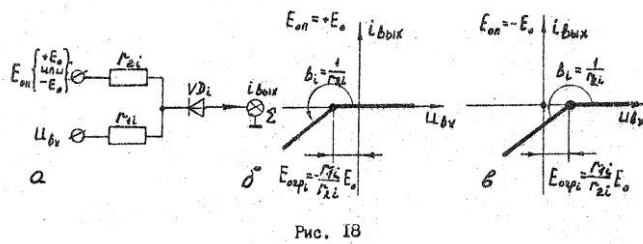


Рис. 18

Примітка. В літературних джерелах така схема іноді називається ДЕ з потенційно заземленим діодом, оскільки у вихідному колі є тільки діод, який підключається до підсумовуючої (потенційно заземленої) точки ОП.

Якщо вважати діод ідеальним (опір відкритого діода ≈ 0 , а опір закритого діода прямує до ∞), характеристика схеми ДЕ при включенні діода в прямому напрямку і при $E_{0п} = +E_0$ (див. рис. 17, а) являє собою елементарну нелінійну характеристику I квадранта, режим «на зачинення» (див. рис. 17, б), а при $E_{0п} = -E_0$ – I квадранта, режим «на відчинеження» (див. рис. 17, в). при включенні діода в зворотному напрямі (рис. 18, а) при $E_{0п} = +E_0$ можна отримати елементарну нелінійну характеристику III квадранта, режим «на відчинеження» (рис. 18, б), а при $E_{0п} = -E_0$ – III квадранта, режим «на зачинення» (рис. 18, в).

Кутові коефіцієнти b_i^i і значення «обмежень по X» $E_{обм i}$ пов'язані з параметрами схеми ДЕ наступними співвідношеннями:

$$b_i^i = 1/r_i; \quad (27)$$

$$E_{обм i} = (-E_{0п})r_{1i}/r_{2i}, \quad (28)$$

причому $E_{0п}$ може бути вибране рівним $+E_0$ або $-E_0$ в залежності від необхідного режиму роботи ДЕ («на відчинеження» та «на зачинення»).

Для отримання елементарних нелінійних характеристик II квадранта (рис. 19, б, в) і IV квадранта (рис. 20, б, в) використовуються схеми трьохполусних ДЕ з інвертором, підключеним до входу (див. рис. 19, а, 20, а), причому розрахункові співвідношення мають вигляд

$$b_i^i = -1/r_{1i}; \quad (29)$$

$$E_{обм i} = E_{0п}r_{1i}/r_{2i}. \quad (30)$$

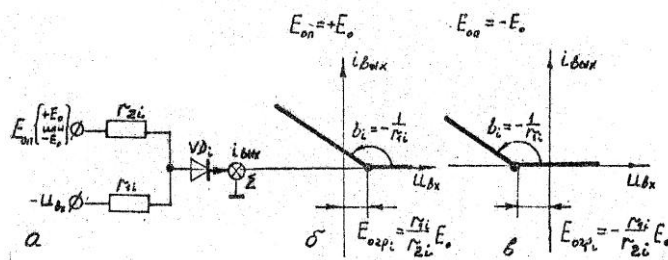


Рис. 19

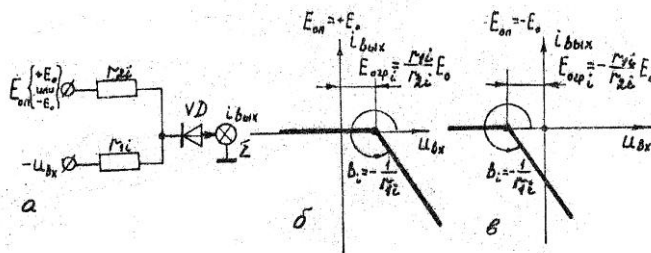


Рис. 20

Таким чином, замінивши в функціональній електричній схемі функціональні елементи відповідними принциповими схемами, можна отримати принципову електричну схему спеціалізованого ФП.

Примітка. Підсилювач, на основі якого зібраний ФП, не вибирається.

Формули для обчислення опорів лінійних та діодних елементів за відомими значеннями параметрів лінійних та елементарних нелінійних характеристик можуть бути легко отримані з (20)-(30) з урахуванням того, що $|E_{0n}| = E_0$ і мають наступний вигляд:

$$r_c = E_0 / |i_c|; \quad (31)$$

$$r_0 = 1 / |b_0|; \quad (32)$$

$$r_1 = 1 / |b_1|; \quad (33)$$

$$r_2 = \frac{r_{1i} E_0}{|U_x|} = E_0 / [|b_0| |U_x|]; \quad (34)$$

$$r_{1i} = 1 / |b_i|; \quad (35)$$

$$r_{2i} = \frac{r_{1i} E_0}{|E_{0\text{обмі}}|} = E_0 / [|b_0| |E_{0\text{обмі}}|]. \quad (36)$$

В приведені формули слід підставляти відомі абсолютні значення i_c , b_0 , U_x , b_i , $E_{0\text{обмі}}$, а також обране значення E_0 , оскільки знаки мають бути враховані вибором конкретної схеми елемента і полярності E_{0n} .

Примітка. Всі параметри струмових характеристик були виражені через значення $R_0(R_1)$; отже, значення всіх опорів схеми, обчислені за формулами (31)-(36), також залежать від $R_0(R_1)$. Конкретне значення $R_0(R_1)$ обирається після всіх обчислень таким чином, щоб усі опори знаходились в діапазоні 1 кОм...1 МОм.

6. СКЛАДАННЯ КАРТИ НАЛАШТУВАННЯ ДІОДНОГО УНІВЕРСАЛЬНОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДУФП ДЛЯ АНАЛОГОВИХ ЕОМ МН-7

Діодні універсальні функціональні перетворювачі, що використовуються в аналогових ЕОМ типу МН-7, також засновані на принципі кусочно-лінійної апроксимації. Такі ДУФП моделюють математичний вираз вигляду (16) та містять:

- лінійний елемент, моделюючий початкове значення функції (“F(0)”);
- лінійний елемент, моделюючий початковий нахил (“kx”);
- десять діодних елементів, кожен з яких моделює елементарну нелінійну характеристику;
- суматор на 12 входів, що підсумовує вихідні сигнали всіх лінійних і нелінійних елементів.

Ці функціональні перетворювачі є універсальними, тобто моделююча характеристика ДУФП може бути змінена за рахунок перебудови елементів.

Налаштування ДУФП здійснюється за картою налаштування (табл. 2).

У лівому верхньому кутку карти налаштування приводиться функція, для якої складена дана карта налаштування. В першу графу таблиці заносяться дані, що характеризують початкове значення функції (умовний запис “F(0)”), в другу – дані, що характеризують початковий нахил (“kx”). Решта графів призначені для даних щодо налаштування діодних елементів.

Таблиця 2

$[U_2 = F^U(U_1)]$		“F(0)”	“kx”	Діодні елементи									
				“1”	“2”	“3”	“4”	“5”	“6”	“7”	“8”	“9”	“10”
Знак “F(0)”													
Знак “kx”													
Квадрант ДЕ													
”Обмеження по X” ($E_{обм}$) [В]													
“Набір F(x)”	U_1^* [В]												
	U_2^* [В]												

У першому рядку карти налаштування вказується знак початкового значення функції (“F(0)”), знак початкового нахилу (“kx”) і квадранти характеристик для даних елементів. Перемикачі квадрантів ДУФП – спарені, тому для кожної пари ДЕ (1-2, 3-4 і т.д.) вказується один і той же квадрант.

Квадрант характеристики ДЕ визначається за характером зламу в i-му вузлі відносно продовження попередньої ділянки:

для правої гілки злам вгору I квадрант; злам униз – IV квадрант;
 для лівої гілки злам вгору – II квадрант; злам униз – III квадрант.

Аналітично можна визначити квадрант характеристики за різницею кутових коефіцієнтів ділянки, що розглядається, $(k_{i-1,i})$ і попередньої $(k_{i-2,i-1})$:

для правої гілки при $(k_{i-1,i} - k_{i-2,i-1}) > 0$ – I квадрант; при $(k_{i-1,i} - k_{i-2,i-1}) < 0$ – IV квадрант;
 для лівої гілки при $(k_{i-1,i} - k_{i-2,i-1}) < 0$ – II квадрант.

Примітка. Для правої гілки попередня ділянка розміщена лівіше за ту, що розглядається, для лівої – правіше.

В другому рядку карти налаштування вказуються значення напруг обмеження $(E_{обм\ i})$ для діодних елементів («обмеження за X»).

В нижній частині карти налаштування («набір $F(x)$ ») вказуються абсциси U_1^* (в третьому рядку) та ординати U_2^* (в четвертому рядку) точок перетину продовжень відповідних ліній ділянок апроксимуючої ламаної лінії з однієї із сторін квадрата $2U_{max} \times 2U_{max}$ (200 В x 200 В).

Примітка. Горизонтальна лінійна, моделююча “ $F(0)$ ”, і перша лінійна ділянка, що перетинає вісь ординат, яка відтворюється за допомогою початкового нахилу “ k_x ”, можуть продовжуватися в будь-яку сторону; решта лінійних ділянок правої гілки продовжуються лише вправо, лівої гілки – тільки вліво.

Оскільки для ДУФП аналогових ЕОМ типу МН-7 вихідний лінійний діапазон ± 100 В ($U_{max}=100$ В), для цього значення U_{max} необхідно визначити масштаби, потім розрахувати координати вершин ламаної лінії $U_2 = F^U(U_1)$ і кутові коефіцієнти $k_{i-1,i}$ всіх лінійних ділянок ламаної.

Кутовий коефіцієнт $k_{i-1,i}$ лінійної ділянки, розміщеної між вузлами $i-1$ та i , можна легко обчислити за формулою

$$k_{i-1,i} = \frac{U_{2i} - U_{2i-1}}{U_{1i} - U_{1i-1}}, \quad (37)$$

де U_{1i}, U_{2i} – координати i -го (кінцевого) вузла; U_{1i-1}, U_{2i-1} – координати $(i-1)$ -го (початкового) вузла.

Для того, щоб обчислити координати точки перетину будь-якої лінійної ділянки $i-1$, і правої гілки з однієї із сторін квадрата, необхідно обчислити U_2^i за формулою

$$U_2^i = U_{2i-1} + (100 - U_{1i-1})k_{i-1,i} \quad (38)$$

Якщо $-100 \text{ В} \leq U_2^i \leq +100 \text{ В}$, це означає, що продовження лінійної ділянки, що розглядається, перетинає вертикальний рядок $U_1 = 100 \text{ В}$, тобто для цієї ділянки в карту налаштування слід записати

$$U_1^* = 100 \text{ В}; \quad U_2^* = U_2^i. \quad (39)$$

Якщо $U_2^i > 100 \text{ В}$, продовження лінійної ділянки, що розглядається, перетинає горизонтальну сторону $U_2=100 \text{ В}$, і для цієї ділянки інформація для карти налаштування повинна бути визначені за формулами

$$U_1^* = U_{1i-1} + (100 - U_{2i-1})/k_{i-1,i}; \quad U_2^* = 100 \text{ В.} \quad (40)$$

Якщо $U_2^i < -100 \text{ В}$, продовження лінійної ділянки, що розглядається, перетинає горизонтальну сторону $U_2 = -100 \text{ В}$, і інформація для карти налаштування визначається за формулами

$$U_1^* = U_{1i-1} + (-100 - U_{2i-1})/k_{i-1,i}; \quad U_2^* = 100 \text{ В.} \quad (41)$$

Примітка. Для ділянок правої гілки вузол і лежить правіше від вузла і-1, для ділянок лівої гілки – лівіше.

Для розрахунку точок перетину лінійних ділянок лівої гілки з однієї із сторін квадрата ($U_1 = -100 \text{ В}$; $U_2 = 100 \text{ В}$ або $U_2 = -100 \text{ В}$) розрахункові формули мають аналогічний вигляд:

$$U_2^i = U_{2i-1} + (-100 - U_{1i-1})k_{i-1,i}; \quad (42)$$

$$U_1^* = -100 \text{ В}; \quad U_2^* = +U_2^i, \quad (43)$$

якщо $-100 \text{ В} \leq U_2^i \leq +100 \text{ В}$;

$$U_1^* = U_{1i-1} + (100 - U_{2i-1})/k_{i-1,i}; \quad U_2^* = 100 \text{ В,} \quad (44)$$

якщо $U_2^i > 100 \text{ В}$;

$$U_1^* = U_{1i-1} + (-100 - U_{2i-1})/k_{i-1,i}; \quad U_2^* = -100 \text{ В,} \quad (45)$$

якщо $U_2^i < -100 \text{ В}$.

Для ламаної лінії $U_2 = F^U(U_1)$, що має дев'ять лінійних ділянок, використовуватиметься вісім, а для десяти ділянок – дев'ять діючих елементів. Таким чином, один або два ДЕ не використовуються, і відповідна інформація в карті налаштування ДУФП відсутня.

Оскільки апаратура налаштування аналогової ЕОМ типу МН-7 дозволяє встановити значення напруг з точністю 0,1 В, всі значення, вказані в карті налаштування ДУФП, повинні округлятися до десятих вольт.

На рис. 21 показаний приклад апроксимуючої ламаної лінії $U_2 = F^U(U_1)$ для $U_{\text{пвх}} = 100 \text{ В}$. вузли інтерполяції від 0 до 9 пронумеровані таким чином, щоб лінійна ділянка 0-1 «забезпечувалася» лінійним елементом, що моделює початковий нахил ("кх").

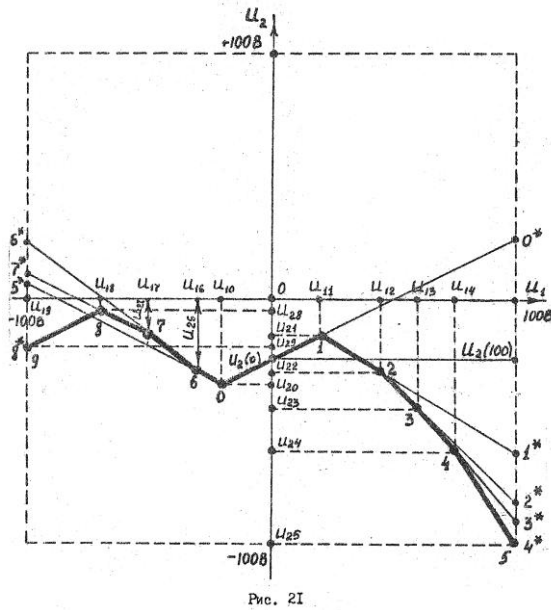
Початкові значення функції $U(0) = -25 \text{ В}$. Коефіцієнти вузлів інтерполяції наступні:

$$U_{10} = -20 \text{ В}; \quad U_{20} = -35 \text{ В}; \quad U_{11} = 20 \text{ В}; \quad U_{21} = -15 \text{ В}; \quad U_{12} = 45 \text{ В};$$

$$U_{22} = -30 \text{ В}; \quad U_{13} = 60 \text{ В}; \quad U_{23} = -45 \text{ В}; \quad U_{14} = 75 \text{ В}; \quad U_{24} = -63 \text{ В};$$

$$U_{15} = -100 \text{ В}; \quad U_{25} = -100 \text{ В}; \quad U_{16} = -30 \text{ В}; \quad U_{17} = -50 \text{ В}; \quad U_{27} = -15 \text{ В};$$

$$U_{18} = -70 \text{ В}; \quad U_{28} = -5 \text{ В}; \quad U_{19} = -100 \text{ В}; \quad U_{29} = -20 \text{ В}; \quad U_{26} = -30 \text{ В}.$$



Таким чином, для приведеної залежності кутові коефіцієнти, обчислені за формулою (37), мають наступні значення: $k_{01} = 0.5$; $k_{12} = -0.6$; $k_{23} = -1$; $k_{34} = -1.2$; $k_{45} = -1.48$; $k_{06} = -0.5$; $k_{67} = -0.75$; $k_{78} = -0.5$; $k_{89} = 0.5$.

Отже, знак “F(0)” є “-” ($U_{20} < 0$); знак “kx” є “+” ($k_{01} > 0$), квадрант ДЕ 1 і 2 – “IV” ($k_{12} - k_{01} = -1.1 < 0$ і $k_{23} - k_{12} = -0.4 < 0$); квадрант ДЕ 3 і 4 – “IV” ($k_{34} - k_{23} = -0.2 < 0$ і $k_{23} - k_{12} = -0.28 < 0$); квадрант ДЕ 5 і 2 – “II” ($k_{06} - k_{01} = -1 < 0$ і $k_{67} - k_{06} = -0.25 < 0$); квадрант ДЕ 7 і 8 – “III” ($k_{78} - k_{67} = 0.25 > 0$ і $k_{89} - k_{78} = 1 > 0$). Значення «обмеження за X» ($E_{обм i}$) дорівнюють абсцисам початкових точок відповідних лінійних ділянок: $E_{обм1} = U_{11} = 20$ В; $E_{обм2} = U_{12} = 45$ В; $E_{обм3} = U_{13} = 60$ В; $E_{обм4} = U_{14} = 75$ В; $E_{обм5} = U_{10} = -20$ В; $E_{обм6} = U_{16} = -30$ В; $E_{обм7} = U_{17} = -50$ В; $E_{обм8} = U_{18} = -70$ В.

Примітка. Значення $E_{обм i}$ – це напруга, при якій буде відчинятися i-й ДЕ.

Координати точок перетину продовжень лінійних ділянок визначаються за описаною методикою. Ці точки (див. рис. 21) позначені 0^* , 1^* , ..., 8^* , причому точки 4^* та 8^* співпадають з точками 5 і 9. Для даної характеристики всі ці точки розташовані на вертикальних сторонах квадрата ($U_1 = +100$ В; $U_1 = -100$ В).

Координати точки перетину продовження першої лінійної ділянки (“kx”) $0-1$, тобто координати точки 0^* , обчислені за формулами (38) і (39): $U_{10}^* = 100$ В; $U_{20}^* = U_{20} + (100 - U_{10})k_{01} = 25$ В.

Координати точок перетину продовження лінійної ділянки $1-2$ (інформація для ДЕ1), тобто координати точки 1^* : $U_{11}^* = 100$ В; $U_{21}^* = U_{21} + (100 - U_{11})k_{12} = -63$ В.

Аналогічно розраховують координати решти точок:

$$2^* \text{ (ДЕ2): } U_{12}^* = 100 \text{ В; } U_{22}^* = U_{22} + (100 - U_{12})k_{23} = -85 \text{ В.}$$

$$3^* \text{ (ДЕ3): } U_{13}^* = 100 \text{ В; } U_{23}^* = U_{23} + (100 - U_{13})k_{34} = -93 \text{ В.}$$

$$4^* \text{ (ДЕ4): } U_{14}^* = 100 \text{ В; } U_{24}^* = U_{24} + (100 - U_{14})k_{45} = -100 \text{ В.}$$

$$5^* \text{ (ДЕ5): } U_{15}^* = -100 \text{ В; } U_{25}^* = U_{20} + (100 - U_{10})k_{06} = 5 \text{ В.}$$

$$6^* \text{ (ДЕ6): } U_{16}^* = -100 \text{ В; } U_{26}^* = U_{26} + (100 - U_{16})k_{67} = +22,5 \text{ В.}$$

$$7^* \text{ (ДЕ7): } U_{17}^* = -100 \text{ В; } U_{27}^* = U_{27} + (100 - U_{17})k_{78} = +10 \text{ В.}$$

$$8^* \text{ (ДЕ2): } U_{18}^* = -100 \text{ В; } U_{28}^* = U_{28} + (100 - U_{18})k_{89} = -20 \text{ В.}$$

Вся отримана інформація заноситься до карти налаштування ДУФП (табл. 5). Діодні елементи 9 і 10 при відтворенні даної характеристики не використовуються.

7. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Розглянемо приклад виконання контрольної роботи, в якому для більшої наочності кількість відрізків ламаної вибрана рівною 5 (замість 8-9). Останній пункт завдання (побудова карти налаштування ДУФП) докладно та з конкретним прикладом розглянутий в розд. 6 і тому в даному прикладі буде відсутній.

Таблиця 3

[U ₂ = F ^U (U ₁)]		“F(0)”	“k _x ”	Діодні елементи									
				“1”	“2”	“3”	“4”	“5”	“6”	“7”	“8”	“9”	“10”
Знак “F(0)”		-	+	IV		IV		II		III			
Знак “k _x ”													
Квадрант ДЕ													
“Обмеження по x”				20,0	45,0	60,0	75,0	-20,0	-30,0	-50,0	-70,0		
“Набір F(x)”	U ₁ [*] [В]	100	100	100	100	100	100	-100	-100	-100	-100		
	U ₂ [*] [В]	-25,0	-25,0	-63,0	-85,0	-93,0	-100	5,0	22,5	10,0	-20		

Нехай задано нелінійну залежність $y = -\sin x$ в наступному діапазоні зміни аргументу: $x_{\min} = -\frac{\pi}{2}$; $x_{\max} = \frac{\pi}{2}$. Діапазон напруг від -100 до +100 В, тобто $U_{\max} = 100 \text{ В}$, опорна напруга $E_0 = 100 \text{ В}$. На рис. 22 показано графік залежності $y = \sin x$.

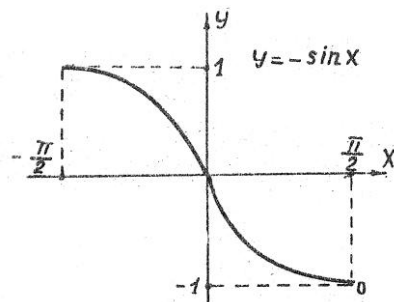


Рис. 22

Визначаємо другу похідну:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \sin x. \quad (46)$$

Будуємо графіки другої похідної $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ (рис. 23, а) і модуля другої похідної $\left| \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|$ (рис. 23, б) для заданого діапазона зміни аргументу $-\pi/2 \leq x \leq \pi/2$.

Судячи з графіку другої похідної, функція $y = -\sin x$ має одну точку перегину з координатами $[0, 0]$, оскільки в цій точці друга похідна змінює знак; права гілка ($0 < x \leq \pi/2$) опукла вниз ($\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} > 0$), ліва гілка ($-\pi/2 \leq x < 0$) опукла вгору ($\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} < 0$). Точок розриву друга похідна не має.

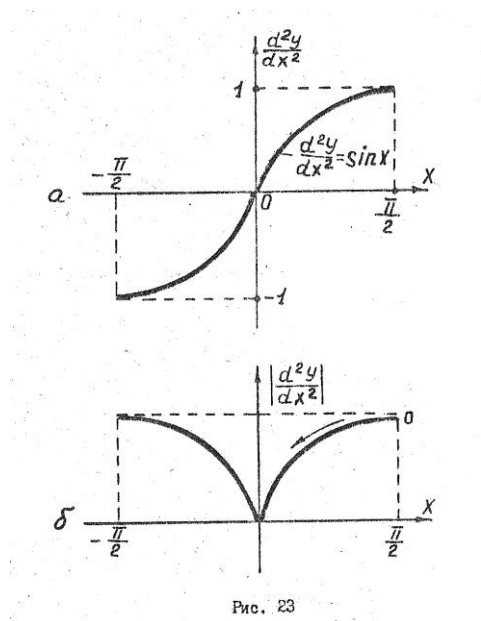


Рис. 23

Отже, перші ділянки зліва та справа будемо обчислювати за формулою (2), решту ділянок – за формулою (3) (Контрольна робота №1 з курсу ТПЕ). Корекцію вузлів інтерполяції необхідно провести, змістивши вузли правої гілки вниз (по осі ординат) на величину $\Delta_{max} f$, а вузли лівої гілки – вгору на цю ж величину, точка перегину $[0, 0]$ при цьому залишається на місці.

Оскільки функція симетрична відносно початку координат, достатньо виконати апроксимацію однієї гілки і перенести отримані дані на другу гілку.

Аналіз графіка $\left| \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|$ (рис. 23, б) дозволяє вибрати в якості початкової точку 0 з координатами $[\pi/2; -1]$ і обчислити n_i в напрямку від цієї точки до початку координат.

Враховуючи, що функція симетрична відносно початку координат, можна зробити висновок, що перші лінійні ділянки справа і зліва від початку координат матимуть один і той же кутовий коефіцієнт. Отже, ці дві лінійні ділянки зливаються в одну, що проходить через початок координат. Таким чином, загальна кількість ділянок завжди буде непарною, а кількість ділянок h_i для кожної гілки має бути рівна трьом при загальній кількості п'ять.

Задача апроксимації в даному випадку полягатиме в тому, щоб підібрати таке значення $\Delta_{max} f$, при якому

$$h_1 + h_2 + h_3 = \pi/2. \quad (47)$$

Значення h_1 і h_2 визначаються за формулою (2), а значення h_3 - за формулою (3) (Контрольна робота №1 з курсу ТПЕ),.

Підбравши значення $\Delta_{\max} f = 0,0163$, обчислимо h_1 і h_2 , округливши значення до четвертої значущої цифри: $h_1 = 0,5106$; $h_2 = 0,5466$.

Якщо обчислити довжину останньої ділянки h_3 за формулою (3) з Контрольної роботи №1 з курсу ТПЕ.

, отримаємо $h_3 = 0,5151$. Значення h_3 , обчислене з рівняння (47), повинне дорівнювати 0,5136. Таким чином, зменшуємо отримане за формулою (3) з Контрольної роботи №1 з курсу ТПЕ значення h_3 і приймаємо його рівним 0,5136, тобто $h_3 = 0,5136$.

Примітка. Дозволяється зменшити отримане останнє значення h_3 не більше ніж на 0,002, в даному випадку зменшили це значення на 0,0015.

В результаті отримуємо наступні абсиси вузлів інтерполяції: $x_0=1,5708$; $x_1=x_0-h_1=1,0602$; $x_2=x_1-h_2=0,5136$; $x_3=x_2-h_3=0$; $x_4=-x_2=-0,5136$; $x_5=-x_1=-1,0602$; $x_6=-x_0=-1,5708$.

Визначаємо ординати точок, що належать заданій функції $y = \sin x$, також округливши їх до четвертої значущої цифри: $y_3^{\pi} = 0$; $y_2^{\pi} = -0,4913$; $y_1^{\pi} = -0,8724$; $y_0^{\pi} = 1,0000$; $y_4^{\pi} = -y_2^{\pi} = 0,4913$; $y_5^{\pi} = -y_1^{\pi} = 0,8724$; $y_6^{\pi} = -y_0^{\pi} = 1,0000$.

У відповідності з методикою, викладеною в розд. 4 Контрольної роботи №1 з курсу «ТПЕ», визначаємо ординати вершин ламаної лінії, виконавши корекцію обчислених значень на величину $\Delta_{\max} f = 0,0163$ по осі ординат в сторону опуклості функції, залишивши точку перегину без корекції, тобто $y_0 = y_0^{\pi} - \Delta_{\max} f = 1,0000 - 0,0163 = 0,9837$; $y_1 = y_1^{\pi} - \Delta_{\max} f = -0,8724 - 0,0163 = -0,8887$; $y_2 = y_2^{\pi} - \Delta_{\max} f = -0,4913 - 0,0163 = -0,5076$; $y_3 = y_3^{\pi} = 0$; $y_4 = y_4^{\pi} + \Delta_{\max} f = 0,4913 + 0,0163 = 0,5076$; $y_5 = y_5^{\pi} + \Delta_{\max} f = 0,8724 + 0,0163 = 0,8887$; $y_6 = y_6^{\pi} + \Delta_{\max} f = 1,0000 + 0,0163 = 1,0163$.

Отримана симетрична апроксимуюча ламана лінія $y=F(x)$ зображена на рис. 24.

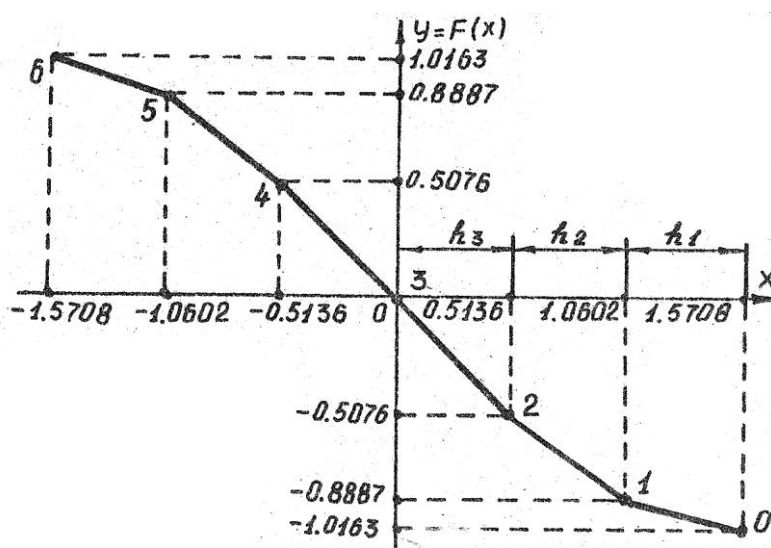


Рис. 24

Виконаємо масштабування отриманої залежності $y=F(x)$. Визначимо масштаби M_1 і M_2 залежних змінних x та y за формулами (3) для $U_{max} = 100$ В: $M_1^* = x_{max}/100 = 0,015708$; $M_2^* = y_{max}/100 = 0,010163$.

Розрахуємо абсциси U_{1i} та ординати U_{2i} вузлів функції $U_2 = F^U(U_1)$ в машинних змінних, використавши формули (4) і округливши отримані значення до $0,001$ □□□, тобто до $0,1$ В:

$$U_{10} = y_{10}/M_1^* = 100 \text{ В};$$

$$U_{20} = y_{20}/M_2^* = -100 \text{ В};$$

$$U_{11} = y_{11}/M_1^* = 67,5 \text{ В};$$

$$U_{21} = y_{21}/M_2^* = -87,4 \text{ В};$$

$$U_{12} = y_{12}/M_1^* = 32,7 \text{ В};$$

$$U_{22} = y_{22}/M_2^* = -49,9 \text{ В};$$

$$U_{13} = y_{13}/M_1^* = 0 \text{ В};$$

$$U_{23} = y_{23}/M_2^* = 0 \text{ В};$$

$$U_{14} = y_{14}/M_1^* = -32,7 \text{ В} = -U_{12};$$

$$U_{24} = y_{24}/M_2^* = 49,9 \text{ В} = -U_{22};$$

$$U_{15} = y_{15}/M_1^* = -67,5 \text{ В} = -U_{11};$$

$$U_{25} = y_{25}/M_2^* = 87,4 \text{ В} = -U_{21};$$

$$U_{16} = y_{16}/M_1^* = -100 \text{ В} = -U_{10};$$

$$U_{26} = y_{26}/M_2^* = 100 \text{ В} = -U_{20}.$$

На рис. 25 показано отриману нелінійну залежність $U_2 = F^U(U_1)$ в машинних змінних.

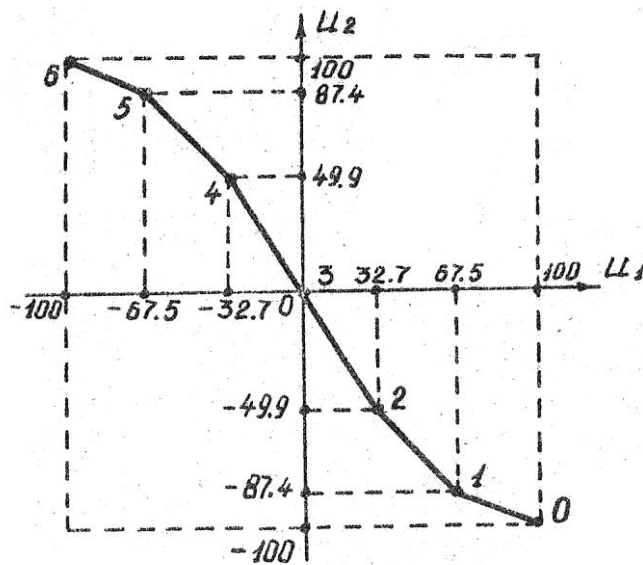


Рис. 25

Обчислюємо значення кутових коефіцієнтів для всіх лінійних ділянок за формулою (5), округливши отримані значення k_{ij} :

$$\text{для ділянки 1 між точками 0 і 1 } k_1 = [-100 - (-87,4)] / (100 - 67,5) = -0,3877;$$

для ділянки 2 між точками 1 і 2 $k_2 = [-87,4 - (-49,9)] / (67,5 - 32,7) = -1,0776$;

для ділянки 3 між точками 2 і 3 $k_3 = -49,9 / 32,7 = -1,5260$;

для ділянки 4 між точками 3 і 4 $k_4 = 49,9 / (-32,7) = -1,5260$;

для ділянки 5 між точками 4 і 5 $k_5 = (87,4 - 49,9) / [-67,5 - (-32,7)] = -1,0776$;

для ділянки 6 між точками 5 і 6 $k_6 = (100 - 87,4) / [-100 - (-67,5)] = -0,3877$.

Лінійні ділянки 3 і 4 мають один і той же кутовий коефіцієнт ($k_3 = k_4$), тому існує одна лінійна ділянка, що проходить між точками 2 і 4.

Відтворюємо струмову характеристику $i_f = f^i(U_1)$ вхідного кола для першої структури НОП. Характеристика показана на рис. 26, причому R_0 - опір кола зворотного зв'язку, що обирається наприкінці розрахунків.

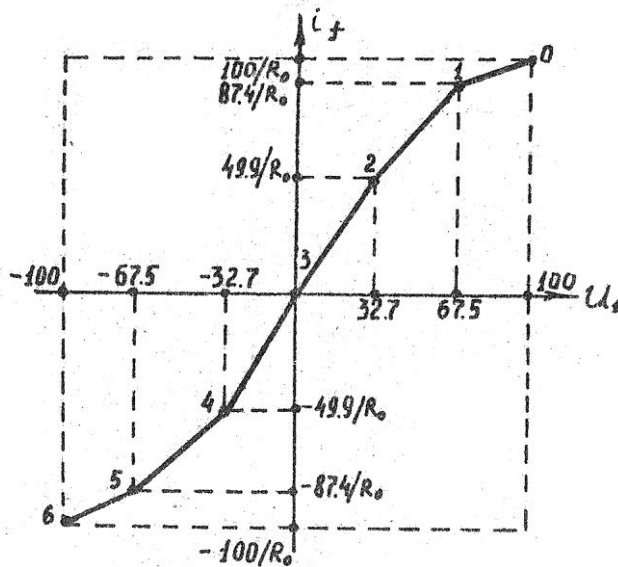


Рис. 26

Аналіз приведеної струмової характеристики показує, що оптимального варіанта розкладання (лише на елементарні характеристики з додатнім кутовим коефіцієнтом) не існує.

Струмова характеристика $i_{\square} = \square^i(U_2)$ кола зворотного зв'язку для другої структури НОП, отримана поворотом характеристики $U_2 = F^U(U_1)$ (див. рис. 25) за годинниковою стрілкою на 90° і зменшенням ординат в R_1 разів, зображена на рис. 27.

Абсциси і ординати вузлових точок струмової характеристики $i_{\square} = \square^i(U_2)$ також показані на рис. 27, а значення кутових коефіцієнтів b_{ik}^i , що обчислюються за формулою $b_i^i = -1 / (k_i - k_1)$:

$$b_1^i = 0,6553/R_I \quad (\text{ділянка між точками 4 і 2});$$

$$b_2^i = 0,9280/R_I \quad (\text{ділянка між точками 2 і 1});$$

$$b_3^i = 2,5794/R_I \quad (\text{ділянка між точками 1 і 0});$$

$$b_4^i = 0,9280/R_I \quad (\text{ділянка між точками 4 і 5});$$

$$b_5^i = 2,5794/R_I \quad (\text{ділянка між точками 5 і 6}).$$

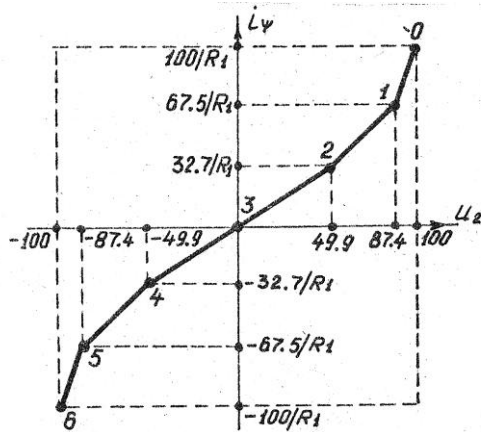
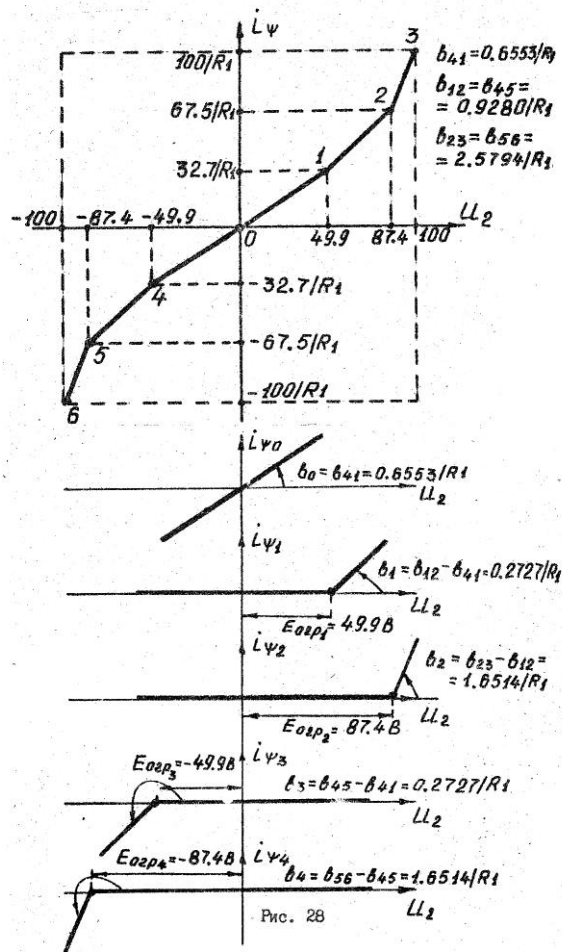


Рис. 27

Для характеристики $i = i(U_2)$, що розглядається, існує варіант оптимального розкладання, якщо в якості початкової точки вибрати точку $[0, 0]$. Цей варіант показано на рис. 28, причому нумерація вузлів змінена таким чином, щоб початкова точка мала номер «0», а вузлова точка правої гілки – послідовну нумерацію 1, 2 і 3 від точки 0. При цьому значення кутових коефіцієнтів b_{ik}^i між вузлами i і k будуть виражені через значення b_i^i (див. рис. 27) наступним чином: $b_{41}^i = b_1^i = 0,6553/R_I$; $b_{12}^i = b_2^i = 0,9280/R_I$; $b_{23}^i = b_3^i = 2,5794/R_I$; $b_{45}^i = b_4^i = 0,9280/R_I$; $b_{56}^i = b_5^i = 2,5794/R_I$.

Для кожного доданка вказані значення кутових коефіцієнтів B_i та абсцис точок обмеження $E_{o\delta M i}$:

$$B_0 = b_{41}^i = 0,6553/R_I; \quad B_1 = b_{12}^i - b_{41}^i = 0,2727/R_I; \quad B_2 = b_{23}^i - b_{12}^i = 1,6514/R_I; \quad B_3 = b_{45}^i - b_{41}^i = 0,2727/R_I; \quad B_4 = b_{56}^i - b_{45}^i = 1,6514/R_I; \quad E_{o\delta M 1} = 49.9 B; \quad E_{o\delta M 2} = 87.4 B; \quad E_{o\delta M 3} = -49.9 B; \quad E_{o\delta M 4} = -87.4 B.$$



На рис. 29 зображена функціональна схема, на рис. 30 – схема електрична принципова спеціалізованого ДФП, що моделює задану характеристику при обраному оптимальному варіанті розкладання.

Значення R_0 визначається за формулою $R_0 = I/B_0 = 1.5260R_1$. значення R_{i1} ($i=1, 2, 3, 4$) визначається за аналогічними формулами: $R_{11} = I/B_1 = 3.7037$; $R_{21} = I/B_2 = 0.6056$; $R_{31} = I/B_3 = 3.7037$; $R_{41} = I/B_4 = 0.6056$

Значення R_{i2} визначаються із співвідношення $E_{обм.i} = -\frac{R_{i1}}{R_{i2}}(\pm E_0)$ і для $E_0 = 100$ В отримаємо:

$$R_{12} = \frac{R_{11} \cdot 100}{E_{обм.1}} = \frac{3.7037 \cdot 100}{49.9} R_1 = 7.4222 R_1;$$

$$R_{22} = \frac{R_{21} \cdot 100}{E_{обм.2}} = \frac{0.6056 \cdot 100}{87.4} R_1 = 0.6930 R_1;$$

$$R_{32} = 7.4222 R_1; \quad R_{42} = 0.6930 R_1.$$

Таким чином, максимальний опір $R_{12} = R_{32} = 7.4222 R_1$, мінімальний опір - $R_{21} = R_{41} = 0.6056 R_1$.

Оскільки необхідно, щоб усі опори знаходились в діапазоні 1 кОм...1 МОм, вибираємо $R_1 = 10$ кОм і отримуємо $R_0 = 15.26$ кОм; $R_{15} = 37.037$ кОм; $R_{12} = 74.222$ кОм; $R_{21} = 6.056$ кОм; $R_{22} = 6.93$ кОм; $R_{31} = 37.037$ кОм; $R_{32} = 74.222$ кОм; $R_{41} = 6.056$ кОм; $R_{42} = 6.93$ кОм.

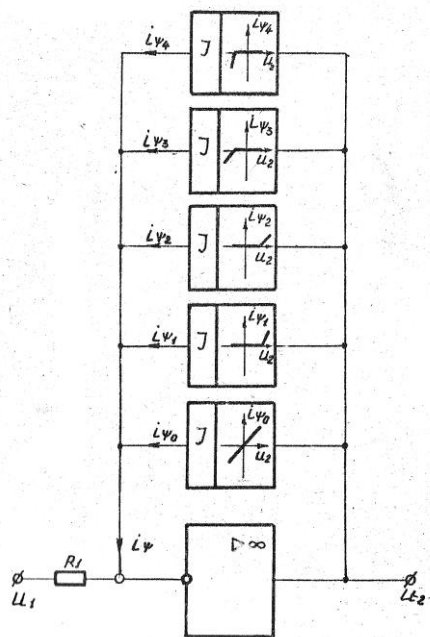


FIG. 29

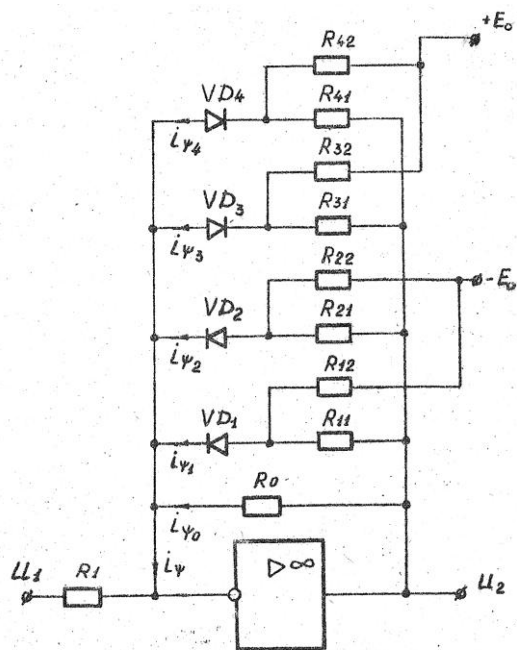


FIG. 30