

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 6

Тема : Моделювання та дослідження добуточно-дільникового блоку (ДДБ) у режимі множення.

Мета роботи: Вивчити принципи побудови добуточних пристроїв непрямої дії, заснованих на квадратичному перетворенні; освоїти методику розрахунку функціональних перетворювачів на прикладі ДФП і методику еквівалентних перетворень резистивних матриць; оцінити похибку виконання операції множення; розглянути способи зміни коефіцієнтів передачі ДДБ в режимі множення; здобути навички планування, проведення та обробки результатів двохфакторного експерименту на прикладі дослідження блоку множення.

Завдання на роботу

1. Уважно ознайомитись з теоретичними відомостями, які приведені нижче.
2. Вибрати з таблиці варіантів дані, відповідно вашому варіанту.

Таблиця варіантів

№	K1	K2	R
101	1.2	0.5	5kOm
102	1.1	0.42	6.4kOm
103	1.6	0.64	4.35kOm
104	1.35	0.8	4kOm
105	1.25	0.72	4.5kOm
106	1.5	0.85	5.5kOm
107	1.3	0.7	4.8kOm
108	1.2	0.9	5kOm
109	1.35	0.62	4.25kOm
110	1.7	0.5	6kOm
110	1.5	0.5	5kOm
111	1.2	0.42	6.4kOm
112	1.8	0.64	4.35kOm
113	1.15	0.8	4kOm
114	1.35	0.72	4.5kOm
115	1.4	0.85	5.5kOm
116	1.2	0.7	4.8kOm
117	1.8	0.9	5kOm
118	1.35	0.62	4.25kOm
119	1.2	0.5	6kOm
120	1.5	0.6	5kOm
121	1.2	0.22	6.4kOm
122	1.8	0.84	4.35kOm
123	1.15	0.9	4kOm
124	1.35	0.12	4.5kOm
125	1.4	0.35	5.5kOm

126	1.2	0.5	4.8kOm
127	1.8	0.2	5kOm
128	1.35	0.42	4.25kOm
129	1.2	0.6	6kOm
130	1.2	0.2	1kOm
201	1.2	0.5	3kOm
202	1.1	0.42	4.4kOm
203	1.6	0.64	6.35kOm
204	1.35	0.8	1kOm
205	1.25	0.72	9.5kOm
206	1.5	0.85	3.5kOm
207	1.3	0.7	2.8kOm
208	1.2	0.9	7kOm
209	1.35	0.62	2.25kOm
210	1.7	0.5	3kOm
210	1.5	0.5	5kOm
211	1.2	0.42	4.4kOm
212	1.8	0.64	4.25kOm
213	1.15	0.8	3kOm
214	1.35	0.72	7.5kOm
215	1.4	0.85	1.5kOm
216	1.2	0.7	2.8kOm
217	1.8	0.9	3kOm
218	1.35	0.62	8.25kOm
219	1.2	0.5	4kOm
220	1.5	0.6	3kOm
221	1.2	0.22	7.4kOm
222	1.8	0.84	8.35kOm
223	1.15	0.9	2kOm
224	1.35	0.12	4.5kOm
225	1.4	0.35	5.5kOm
226	1.2	0.5	6.8kOm
227	1.8	0.2	7kOm
228	1.35	0.42	1.25kOm
229	1.2	0.6	3kOm
230	1.2	0.2	4kOm
301	1.3	0.5	3kOm
302	1.2	0.42	4.4kOm
303	1.8	0.64	6.35kOm
304	1.75	0.8	1kOm
305	1.55	0.72	9.5kOm
306	1.3	0.85	3.5kOm
307	1.6	0.7	2.8kOm
308	1.5	0.9	7kOm
309	1.15	0.62	2.25kOm
310	1.3	0.5	3kOm
310	1.9	0.5	5kOm
311	1.5	0.42	4.4kOm
312	1.2	0.64	4.25kOm
313	1.55	0.8	3kOm

314	1.45	0.72	7.5kOm
315	1.7	0.85	1.5kOm
316	1.4	0.7	2.8kOm
317	1.3	0.9	3kOm
318	1.15	0.62	8.25kOm
319	1.7	0.5	4kOm
320	1.1	0.6	3kOm
321	1.6	0.22	7.4kOm
322	1.3	0.84	8.35kOm
323	1.75	0.9	2kOm
324	1.25	0.12	4.5kOm
325	1.7	0.35	5.5kOm
326	1.1	0.5	6.8kOm
327	1.2	0.2	7kOm
328	1.65	0.42	1.25kOm
329	1.8	0.6	3kOm
330	1.1	0.2	4kOm
401	1.3	0.6	3kOm
402	1.2	0.32	4.4kOm
403	1.8	0.84	6.35kOm
404	1.75	0.4	1kOm
405	1.55	0.32	9.5kOm
406	1.3	0.15	3.5kOm
407	1.6	0.3	2.8kOm
408	1.5	0.4	7kOm
409	1.15	0.22	2.25kOm
410	1.3	0.6	3kOm
410	1.9	0.1	5kOm
411	1.5	0.93	4.4kOm
412	1.2	0.54	4.25kOm
413	1.55	0.5	3kOm
414	1.45	0.12	7.5kOm
415	1.7	0.55	1.5kOm
416	1.4	0.4	2.8kOm
417	1.3	0.1	3kOm
418	1.15	0.62	8.25kOm
419	1.7	0.1	4kOm
420	1.1	0.5	3kOm
421	1.6	0.62	7.4kOm
422	1.3	0.14	8.35kOm
423	1.75	0.6	2kOm
424	1.25	0.62	4.5kOm
425	1.7	0.25	5.5kOm
426	1.1	0.8	6.8kOm
427	1.2	0.9	7kOm
428	1.65	0.12	1.25kOm
429	1.8	0.8	3kOm
430	1.1	0.4	4kOm
501	1.3	0.6	5kOm
502	1.2	0.32	1.4kOm

503	1.8	0.84	4.35kOm
504	1.75	0.4	5kOm
505	1.55	0.32	5.5kOm
506	1.3	0.15	2.5kOm
507	1.6	0.3	1.8kOm
508	1.5	0.4	4kOm
509	1.15	0.22	1.25kOm
510	1.3	0.6	6kOm
510	1.9	0.1	3kOm
511	1.5	0.93	1.4kOm
512	1.2	0.54	3.25kOm
513	1.55	0.5	7kOm
514	1.45	0.12	2.5kOm
515	1.7	0.55	6.5kOm
516	1.4	0.4	9.8kOm
517	1.3	0.1	4kOm
518	1.15	0.62	4.25kOm
519	1.7	0.1	7kOm
520	1.1	0.5	6kOm
521	1.6	0.62	2.4kOm
522	1.3	0.14	1.35kOm
523	1.75	0.6	7kOm
524	1.25	0.62	4.5kOm
525	1.7	0.25	2.5kOm
526	1.1	0.8	4.8kOm
527	1.2	0.9	9kOm
528	1.65	0.12	4.25kOm
529	1.8	0.8	7kOm
530	1.1	0.4	3kOm
601	1.3	0.5	5kOm
602	1.1	0.42	6.4kOm
603	1.4	0.64	4.35kOm
604	1.75	0.8	4kOm
605	1.25	0.72	4.5kOm
606	1.7	0.85	5.5kOm
607	1.6	0.7	4.8kOm
608	1.1	0.9	5kOm
609	1.95	0.62	4.25kOm
610	1.5	0.5	6kOm
610	1.4	0.5	5kOm
611	1.8	0.42	6.4kOm
612	1.5	0.64	4.35kOm
613	1.35	0.8	4kOm
614	1.15	0.72	4.5kOm
615	1.6	0.85	5.5kOm
616	1.4	0.7	4.8kOm
617	1.6	0.9	5kOm
618	1.25	0.62	4.25kOm
619	1.7	0.5	6kOm
620	1.4	0.6	5kOm

621	1.4	0.22	6.4kOm
622	1.9	0.84	4.35kOm
623	1.55	0.9	4kOm
624	1.35	0.12	4.5kOm
625	1.8	0.35	5.5kOm
701	1.2	0.4	3kOm
702	1.1	0.22	4.4kOm
703	1.6	0.74	6.35kOm
704	1.35	0.5	1kOm
705	1.25	0.22	9.5kOm
706	1.5	0.55	3.5kOm
707	1.3	0.3	2.8kOm
708	1.2	0.1	7kOm
709	1.35	0.32	2.25kOm
710	1.7	0.9	3kOm

3. Зробити розрахунок добуткових блоків з масштабними коефіцієнтами K_1 , K_2 , використовуючи опір заданий у таблиці варіантів як базовий.

4. Замалювати в протоколі шаблони таблиць, необхідних у процесі виконання роботи.

Порядок виконання роботи

1. Перевірити правильність функціонування схем в двох режимах Transient і DC (в режимі DC на вхід подаються вхідні напруги від 0 до 10).
2. При вхідних напругах $U_{вх1}$ і $U_{вх2}$ визначити вихідну напругу $U_{вих}$ і занести в Таблицю 1. Повторити цей досвід з різними значеннями вхідних напруг не менше 7 разів.

	Дослід №	$U_{вх1}, В$	$U_{вх2}, В$	$U_{вих}$ ідеал.	$U_{вих}$ вимір.	Абс. похибка	Відносн. похибка
K1	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						
	7						
K2	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						
	7						

3. Визначити абсолютну і відносну похибку і занести в таблицю 1.
4. Повторити пункти 2.1-2.4 для добуткового блоку, що реалізує функцію $U_{\text{вих}} = K1 * (U_{\text{вх1}} * U_{\text{вх2}})$.
5. Порівняти відносні похибки при різних коефіцієнтах посилення.
6. Відповісти на контрольні питання і зробити висновки по роботі.

*** Примітка: Вихідні струмові характеристики квадраторів дорівнюють:

$$I_{\text{вих}} = \{(U_{\text{вх}})^2\} * 0.2\text{e-}3 \text{ і } I_{\text{вих}} = - \{(U_{\text{вх}})^2\} * 0.2\text{e-}3$$

$$\text{У режимі Х.Х: } U_{\text{вих}} = (U_{\text{вх}})^2 \text{ і } U_{\text{вих}} = - (U_{\text{вх}})^2$$

Зміст звіту

1. Результати підготовки по пп. 3. - 4.
2. Результати виконання лабораторної роботи.

Контрольні питання

1. До якої групи добуткових пристроїв відноситься ДБ, модельований в даній лабораторній роботі.
2. Наведіть остаточний вигляд формули множення, по якій моделюється ДБ.
3. Як зміниться коефіцієнт передачі ДБ k_m , якщо резистор r_0 в ланцюгу ОС ОУ збільшити в 2 рази.
4. Наведіть формулу для визначення кількості ділянок апроксимації заданої функції.
5. Чим визначається величина нахилу характеристики ДЭ?

5. Теоретичні відомості.

5.1. Класифікація та принципи побудови розмножувальних вузлів МУ

Всі МЭ можна розділити на 2 групи:

Добуткові елементи прямої дії (в яких операція множення реалізується за рахунок прямого використання будь-яких фізичних законів):

а) МЭ, засновані на принципі управління коефіцієнтом передачі масштабного ОБ (аналоговий і гібридний варіанти)

б) ДБ, засновані на відхиленні зарядів, що рухаються в електромагнітному полі (засновані на ефекті Холла відхилення зарядів у напівпровіднику)

в) час - імпульсні МБ (аналоговий і гібридний варіанти)

Розмножувальні блоки непрямої дії (вони засновані на методиці тотожного перетворення, причому таке перетворення здійснюється на основі відомих співвідношень алгебри, математичного аналізу, теорії ймовірностей та ін)

а) ДБ, засновані на квадратичному перетворенні співмножників

б) ДБ, засновані на логарифмічному перетворенні співмножників

в) ДБ, засновані на інтегральному перетворенні співмножників

г) ДБ, засновані на тригонометричних перетворенні співмножників

д) ДБ, засновані на принципі перемноження ймовірностей незалежних подій

5.2. Вибір принципу побудови та схемної реалізації ДБ, модельованого в лабораторній роботі.

У даній лабораторній роботі моделюється ДБ непрямої дії, заснований на квадратичному перетворенні співмножників. Твір $x * y$ можна представити еквівалентним співвідношенням:

$$xy = \frac{1}{4} [(x + y)^2 - (x - y)^2]$$

(1)

На основе этой формулы будем последовательно рассматривать схемные реализации МБ с целью получения МБ, использующего минимальное количество ОУ. Будем моделировать МБ следующей структуры :

На основі цієї формули будемо послідовно розглядати схемні реалізації ДБ з метою отримання ДБ, що використовує мінімальну кількість ОП. Будемо моделювати ДБ наступної структури:

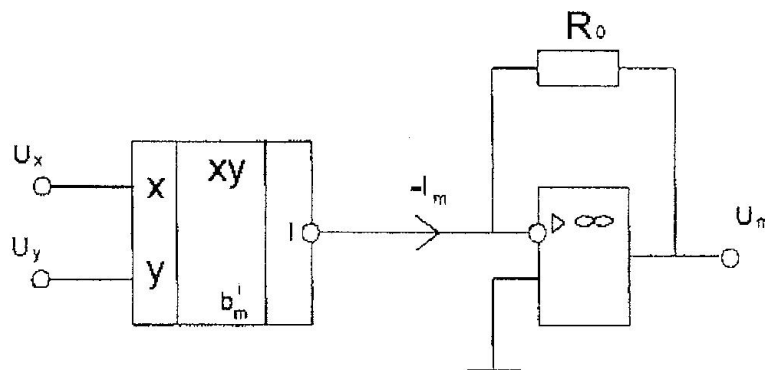


Рис.1

Возможна также реализация МБ на основе множительного элемента(МЭ) с прямым токовым выходом. Преобразование МЭ с инверсным токовым выходом в МЭ с прямым

токовим виходом осуществляется довольно легко; как это делается будет показано ниже. Для получения МЭ с инверсным токовым выходом соответственно преобразуем формулу :

Можлива також реалізація МБ на основі розмножувального елемента (МЕ) з прямим струмовим виходом. Перетворення МЭ з інверсним струмовим виходом в МЭ з прямим струмовим виходом здійснюється досить легко; як це робиться буде показано нижче. Для отримання МЭ з інверсним струмовим виходом відповідно перетворимо формулу:

$$-xy = \frac{1}{4} [-(x+y)^2 + (x-y)^2]$$

та далі

$$xy = -\frac{1}{4} [-(x+y)^2 + (x-y)^2]$$

(2)

Схема, моделююча ДБ за формулою (2), виглядає таким чином:

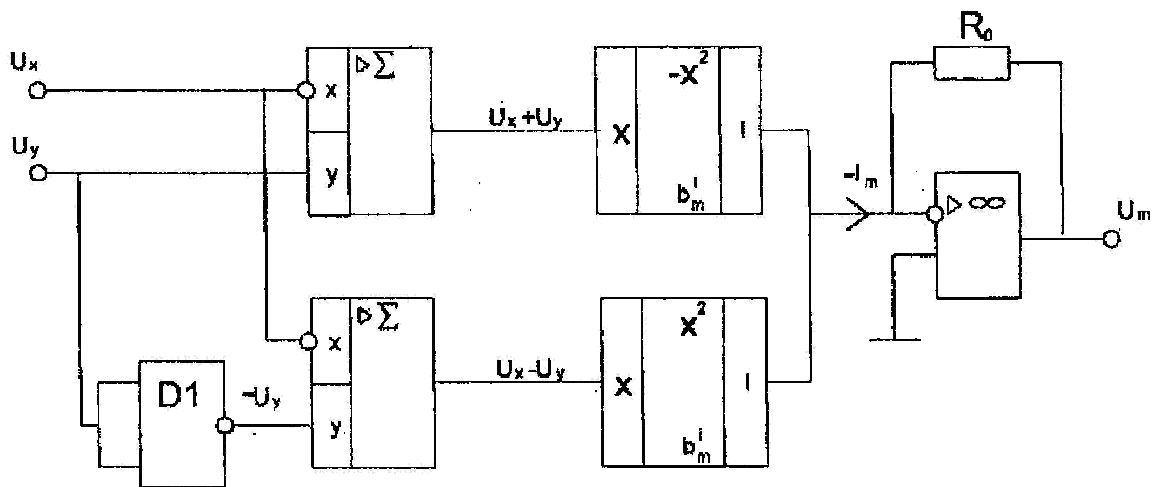


Рис.2

Кожен квадратор виконаний на основі діодних елементів і одного ОП. Для зменшення кількості ОП використовуємо еквівалентні перетворення. Розглянемо наступні тотожності:

$$z^2 = |z|^2 = (-z)^2$$

і їх графічне представлення:

(графіки розташовані в 1 і 2 квадрантах)

уся парабола

права гілка
параболи

ліва гілка параболи

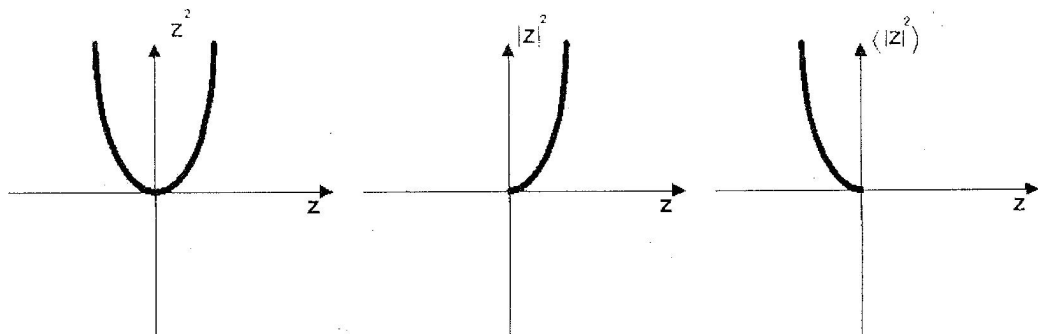


Рис. 3.

Тільки другий варіант дозволяє реалізувати нелінійний операційний блок (НОБ) на пасивних елементах. Аналогічно розглянемо функцію:

$$-z^2 = -|z|^2 = -(-z)^2$$

(графіки розташовані в 3 і 4 квадрантах)

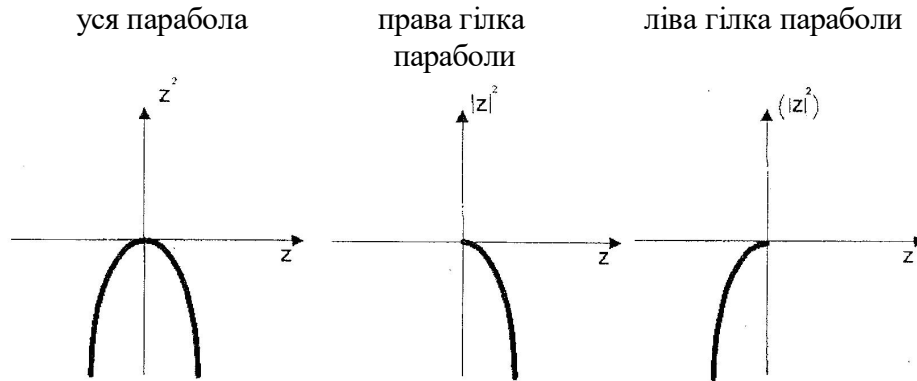


Рис.4.

Здесь реализацию на пассивных элементах допускает третий вариант, т.е. формула умножения (2) с учетом приведенных преобразований имеет вид :

Тут реалізацію на пасивних елементах допускає третій варіант, тобто формула множення (2) з урахуванням наведених перетворень має вигляд:

$$xy = -\frac{1}{4} \left[-(|x+y|)^2 + |x-y|^2 \right]$$

(2a)

Відповідно схема множення буде мати вигляд:

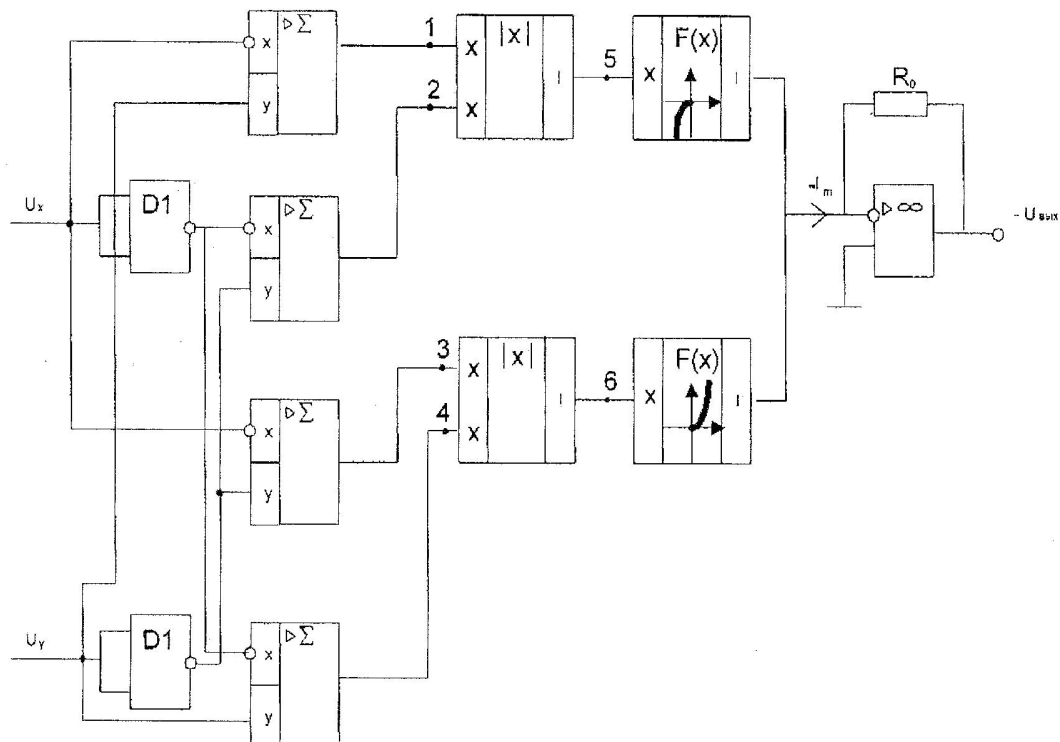


рис.5.

На входи 1 і 2 (див. рис.5.) Подається сигнал пропорційний сумі, а на входи 3 і 4 - різниці вхідних напруг. Будемо спрощувати частину схеми з рис.5, розташовану до квадраторів.

Спочатку розглянемо верхній канал схеми:

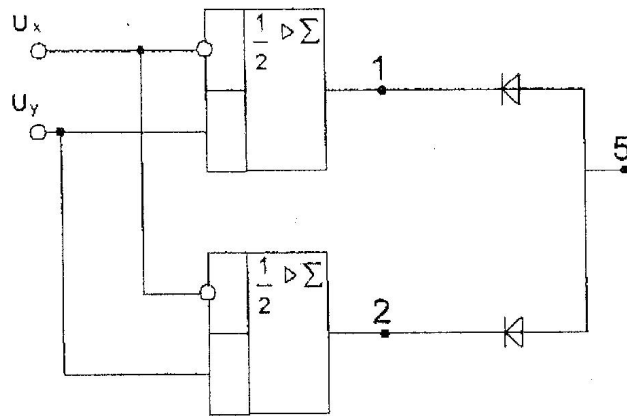
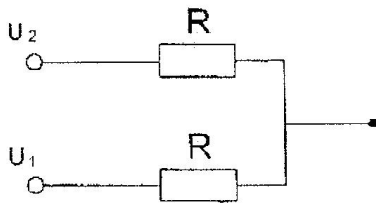
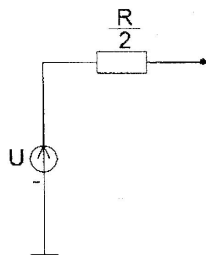


Рис.6.

Так як в т. 1 вимагається сума без інверсії, то в якості верхнього суматора використовуємо пасивний суматор з $k_{\text{пер}} = 0.5$:



Ця схема еквівалентна наступній:



Де

$$U_{\text{екв}} = \frac{\frac{U_1}{R} + \frac{U_2}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

(3)

Значить, схема з рис.6, перетвориться до виду:

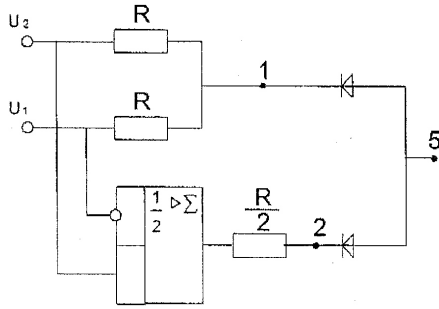


Рис.7

Для спрощення схеми нижнього каналу використовуємо наступне тотожність:

$$0.5 * |x - y| = -0.5 * (x + y) + \max(x, y) \quad (4)$$

Підсумовувати доданки правої частини формули (4) будемо також на пасивному суматорі, відповідно схемне рішення для нижнього каналу:

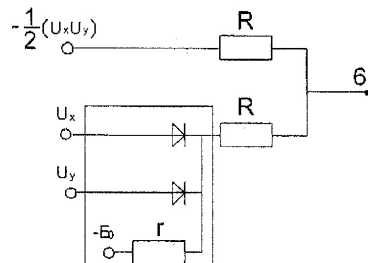


рис.8.

У схемі виділення максимуму (виділена частина на рис.8.) E_0 має задовольняти наступному співвідношенню:

$$\begin{cases} |E_0| > |U_{x \max}| \\ |E_0| > |U_{y \max}| \end{cases}$$

Об'єднаємо схеми рис. 7 і рис. 8.

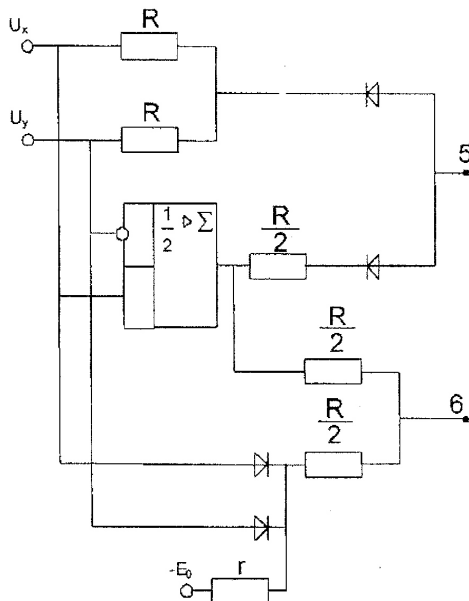
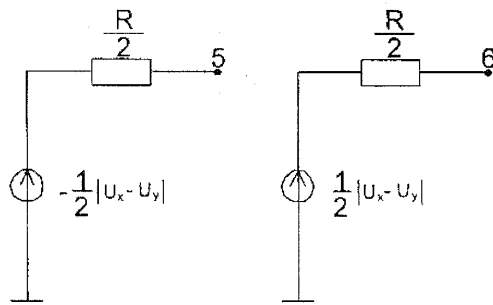


Рис.9.

В даному випадку еквівалентні схеми верхнього і нижнього каналів виглядають відповідно



тобто канали не симетричні. Змінимо схему на рис.9 наступним чином:

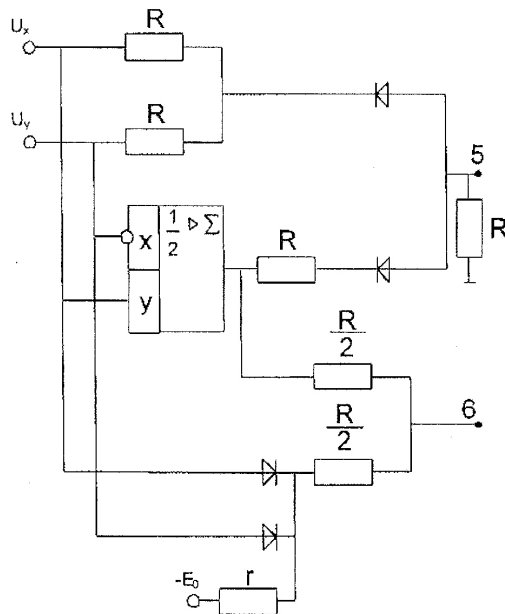
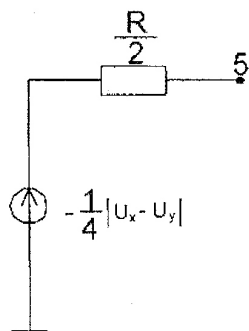


Рис.10.

Тоді еквівалентні схеми каналів будуть такими



Остаточно схема множення виглядає наступним чином (резистори збільшуємо в 2 рази)

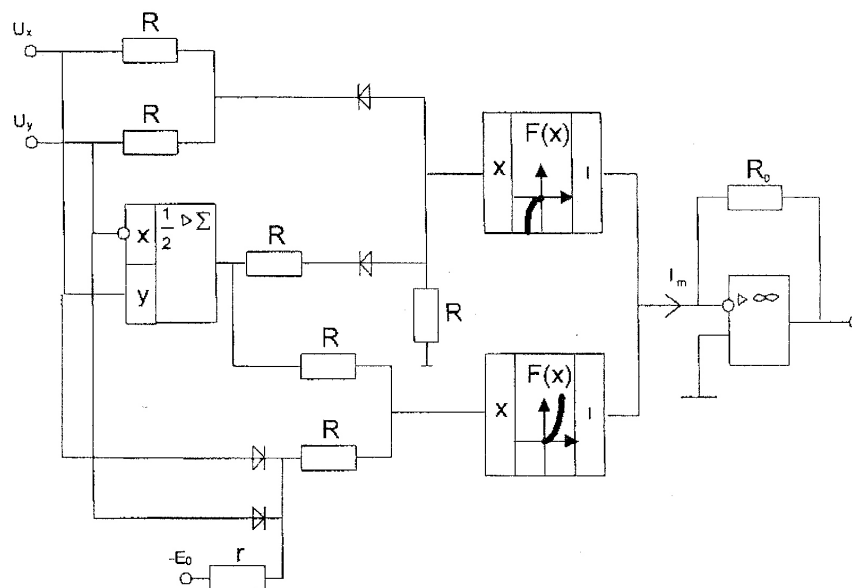


рис.11.

Цей варіант схеми використовує всього 2 ОП. Отримана схема моделює операцію:

$$U_m = k_m \cdot U_x \cdot U_y \quad (5)$$

Діапазон зміни вихідного напруги повинен співпадати з діапазоном зміни вихідних напруг. Виходячи з цього вибирається коефіцієнт k_m . Якщо

$$|U_x| \leq U_{\max}^*$$

$$|U_y| \leq |U_{\max}^*|$$

то

$$k_m = \frac{1}{U_{\max}^*}$$

(6)

5.3. Рекомендації по вибору і розрахунку параметрів схеми. У лінійній частині схеми з рис.11. рекомендується вибрати такі значення для R, m і E:

$$R = 4 \text{ кОм} - 10 \text{ кОм}$$

$$r = 100 \text{ Ом} - 200 \text{ Ом}$$

$$E = 1.2 \dots 1.5 \cdot U_{\max}$$

Значення γ_0 розраховується виходячи з таких міркувань. Схему з рис.11 можна умовно розділити на три частини:

- Лінійна частина;
- Квадратори;
- Масштабний підсилювач;

Крім перетворень вхідних величин у відповідність з формулою (3), кожна частина схеми вносить свій коефіцієнт. Наприклад, на квадратори подаються не модуль різниці і мінус модуль суми, а чверті зазначених величин. Квадратори ж реалізують піднесення в квадрат з якимось коефіцієнтом. Це означає, що значення i_m (див. рис. 11) дорівнює:

$$-i_m = b_m^{\downarrow} \frac{1}{16} \left[-(|U_x + U_y|)^2 + |U_x - U_y|^2 \right]$$

(7)

Тому існує необхідність відповідним чином налаштувати коефіцієнт передачі останньої частини схеми - масштабного підсилювача, - щоб на виході отримати потрібний коефіцієнт (k_m). Як було зазначено раніше

$$U_m = k_m * U_x * U_y$$

Також відомо що

$$-I_m * r_0 = U_m$$

тобто коефіцієнт передачі масштабного підсилювача задається за допомогою r_0 . Зпівставляючи формули (7) - (9), видно, що

$$\frac{1}{16} b_m^{\downarrow} r_0 = k_m$$

$$r_0 = \frac{16k_m}{b_m^{\downarrow}}$$

(10)

Також потрібно відзначити, що в ланцюзі ОС ОУ замість r_0 може використовуватися дільник напруги, тоді $R = r_0 * a$:

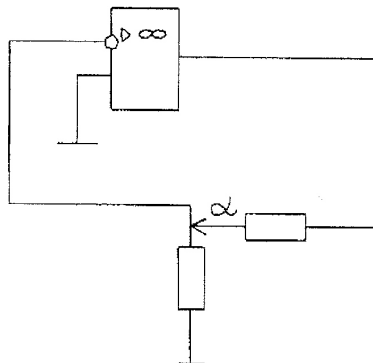


Рис.12.

5.4. Методика розрахунку квадраторів.

Для реалізації залежності $y = F(x)$ часто використовуються діодні функціональні перетворювачі (ДФП), що здійснюють кусково-лінійну апроксимацію заданої функції. Відомо, що для реалізації кусочно-лінійної апроксимації речовій функції $y = F(x)$, заданої на відрізку $[X_{\min}, X_{\max}]$, остання замінюється ламаною кривою $y_n = \Phi(x)$ з помилкою лінійного інтерполювання $-\Delta_{\max}$. Величину $-\Delta_{\max}$ на ділянці апроксимації h_i зазвичай визначають з формули:

$$h_i = \sqrt{\frac{8\Delta_{\max} y}{A}}$$

(11)

де A - максимальне значення 2-ї похідної функції, що апроксимується на ділянці h_i .
Графічне представлення апроксимації дано на рис. 13.

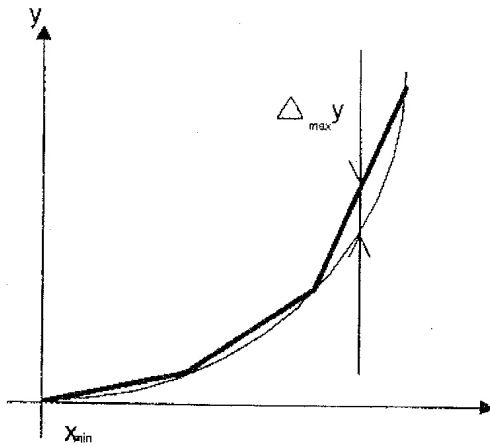


Рис.13

Помимо приведенного метода, существует еще один, который в литературе получил название "с располвиниванием ошибки". Этот метод позволяет при той же ошибке аппроксимации $-\Delta\max_y$ получить в $\sqrt{2}$ раз меньшее количество участков разбиения. Достигается это следующим образом. Сначала значение ошибки $-\Delta\max_y$ увеличивается в 2 раза $-\Delta\max_y = 2 \cdot \Delta\max_y$, тогда формула (11) принимает вид:

Крім наведеного методу, існує ще один, який у літературі здобув назву "з розполовинюванням помилки". Цей метод дозволяє при тій же помилці апроксимації $-\Delta\max_y$ отримати в $\sqrt{2}$ разів меншу кількість ділянок розбиття. Досягається це наступним чином. Спочатку значення помилки $-\Delta\max_y$ збільшується в 2 рази $-\Delta\max_y = 2 \cdot \Delta\max_y$, тоді формула (11) набуває вигляду:

$$h_i = \sqrt{\frac{8\Delta_{\max} y}{A}} = 4\sqrt{\frac{\Delta_{\max} y}{A}}$$

(12)

Ламана, отримана із кроком розбиття, потім зсувається відносно осі Ox на величину $-\Delta\max_y$. Тоді нове значення помилки апроксимації задовольняє нерівності:

$$-\Delta_{\max} y \leq \Delta y \leq \Delta_{\max} y$$

тобто

$$|\Delta y| \leq \Delta_{\max} y$$

значит, максимальная ошибка полученной аппроксимации остается равной $-\Delta\max_y$. ЭТОТ метод иллюстрируется рис. 14.

Перейдем к рассмотрению расчета ДФП, реализующего кусочно-линейную аппроксимацию квадратичной зависимости $y = x^2$. Поскольку $(x^2)'' = \text{const}$, длина 1-го участка разбиения

значить, максимальна помилка отриманої апроксимації залишається рівною $-\Delta\max_y$. ЦЕЙ метод ілюструється рис. 14.

Перейдемо до розгляду розрахунку ДФП, що реалізує кусочно-лінійну апроксимацію квадратичної залежності $y = x^2$. Оскільки $(x^2)'' = \text{const}$, довжина 1-го ділянки розбиття

$$h_i = 4\sqrt{\frac{\Delta_{\max} y}{A}} = 4\sqrt{\frac{\Delta_{\max} y}{2}} = h = \text{const}$$

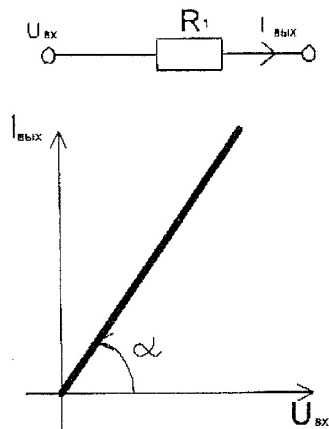
(13)

для заданої помилки апроксимації квадратичної залежності. Отже ми відразу можемо визначити кількість ділянок ламаної для апроксимації з заданою помилкою:

$$n = \frac{|x_{\max} - x_{\min}|}{h} = \frac{|x_{\max} - x_{\min}| \sqrt{2}}{4 \sqrt{\Delta_{\max} y}}$$

(14)

Тепер, задавшись величиною максимальної помилки - $\Delta_{\max} y$ можна розрахувати необхідну кількість ділянок ламаної апроксимації n , округляючи величину n до більшого цілого значення. Для моделювання ділянки ламаної, використовується пасивний діодний елемент (3-х полюсний доданий елемент з потенційно заземленим діодом), за допомогою якого отримують наступну характеристику:



$$I_{вых} = \frac{U_{вх}}{R_1} - \frac{E_0}{R_2}$$

$$U_0 = E_0 \frac{R_1}{R_2}$$

$$R_2 = \frac{E_0 R_1}{U_0}$$

$$a = \frac{1}{R_1}$$

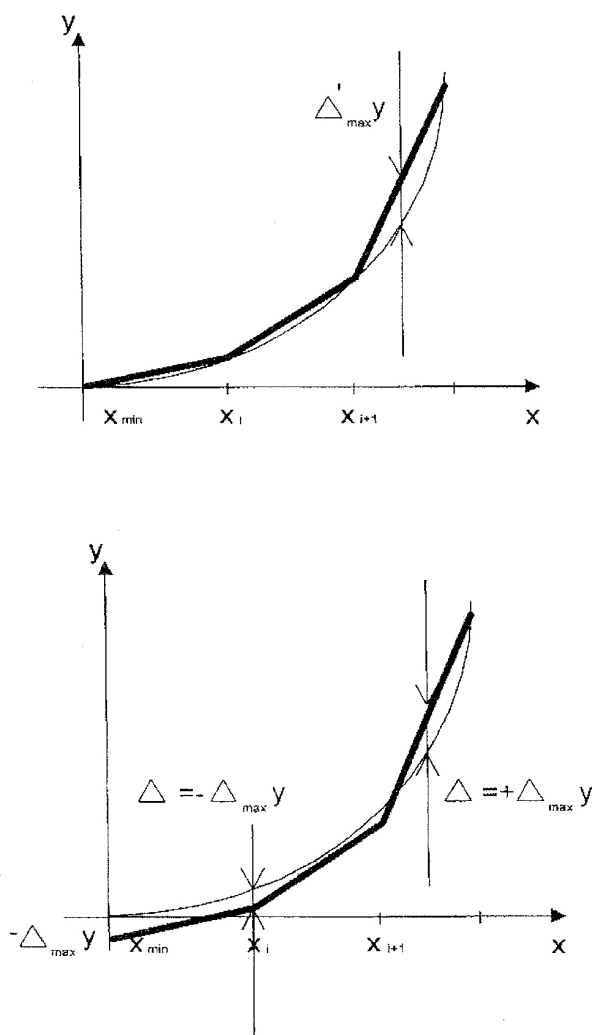


Рис.14.
 При паралельному підключенні декількох ДЭ до точки, в якій сумується отримуємо ламану:

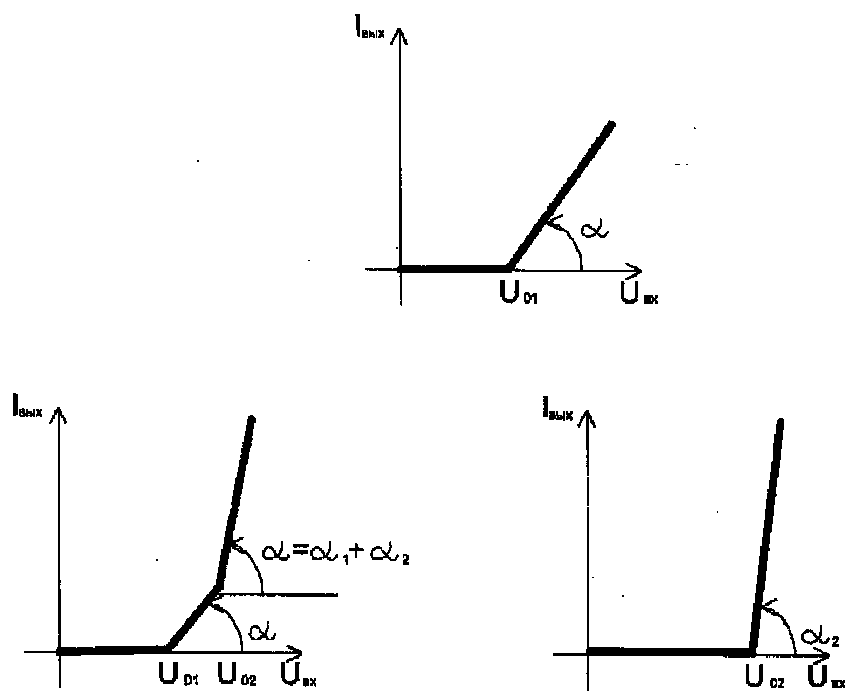


Рис.15.

Для задання початкової ділянки ламаної використовують двополісний елемент:

$$U_0 = E_0 \frac{R_1}{R_2} = 0 \Rightarrow R_2 = 0$$

$$a = \frac{1}{R_1}$$

(15)

Для зміщення ламаної на величину $-\Delta U_{\text{вх}}$ використовують наступний елемент:

$$i_{\text{вх}} = \frac{E_0}{R_2}$$

(16)

Для моделювання квадратичної залежності визначаємо значення кутових коефіцієнтів кожної ділянки:

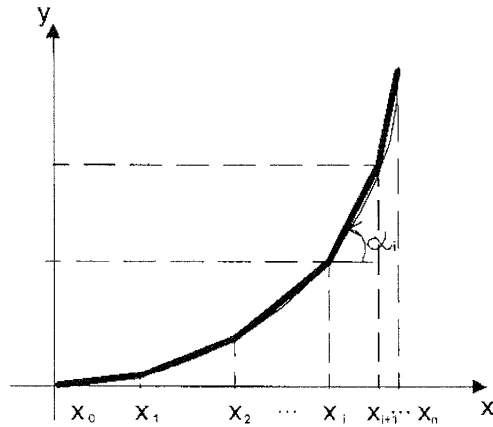


рис.16.

$$a_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{h}$$

$$y_i = x_i^2$$

$$y_{i+1} = x_{i+1}^2 = (x_i + h)^2$$

$$a_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h} = \frac{(x_i + h)^2 - x_i^2}{h} = \frac{h^2 + 2hx_i}{h} = 2x_i + h$$

(17) (18)

Легко помітити, що $a_0 = 0$, а різниця між коефіцієнтами сусідніх ділянок $-a = 2 * X_{i+1} + h - (2 * X_i + h) = 2h$. Формули (13), (17) і (18) приведені для математичних змінних x і y , щоб перейти від них до струму і напруги, використаємо співвідношення:

$$x = m_1 * u, \quad y = m_2 * i$$

(19)

причому коефіцієнт m_1 вибираємо рівним 1: $m_1 = 1$

Коефіцієнт m_2 розраховуємо, знаючи величини $i_{\max}$ і $U_{\max}$, які є вихідними для розрахунку квадратора:

$$m_2 = \frac{I_{\max}}{U_{\max}^2}$$

причому, тому квадратор моделює залежність $i = b m_1 * U^2$ то

$$b m_1^i = m_2$$

Розрахунок квадратора проводиться за наступною схемою:

1. За формулою (13) визначається кількість ділянок апроксимації, і, відповідно, кількість ДЭ, необхідних для апроксимації.

2. Використовуючи формулу (18), визначається коефіцієнти a_i .

3. Використовуючи формули з груп (14) і (15), розраховуються значення опорів R_1 і R_2 .

4. Додається доданок,

$$i \sim m_2 * (-\Delta_{\max} y)$$

використовуючи формулу (16).

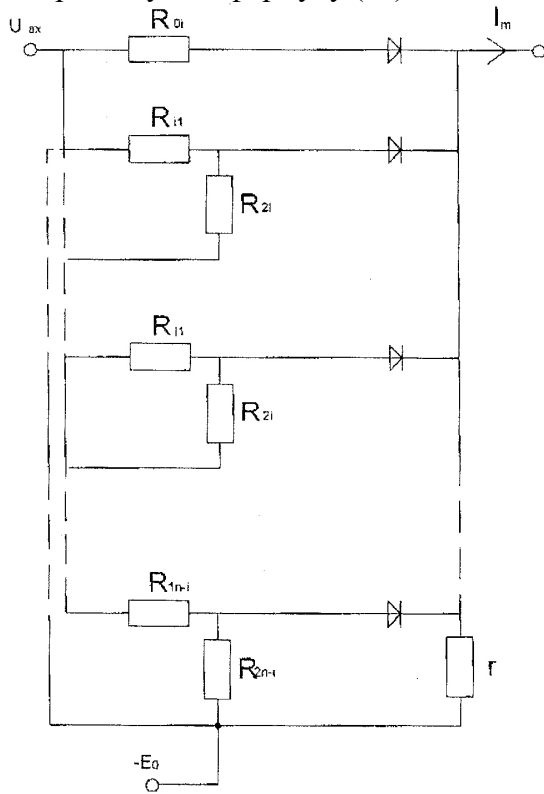


Рис.17.

Схемы квадраторов, реализующих зависимости $y = x^2$ (рис. 17) и $y = -x^2$, отличаются только направлением включения диодов.

5.5. Пересчет сопротивлений квадратора (эквивалентные преобразования резисторных матриц).

Расчет квадратора производится исходя из того, что на его вход подключается идеальный источник напряжения с $\Gamma_{\text{экв}} = 0$:

Схеми квадраторів, що реалізують залежності $y = x^2$ (рис. 17) і $y = -x^2$, відрізняються тільки напрямком включення діодів.

5.5. Перерахунок опорів квадратора (еквівалентні перетворення резисторних матриць).

Розрахунок квадратора проводиться виходячи з того, що на його вхід підключається ідеальне джерело напруги з $\Gamma_{\text{екв}} = 0$:

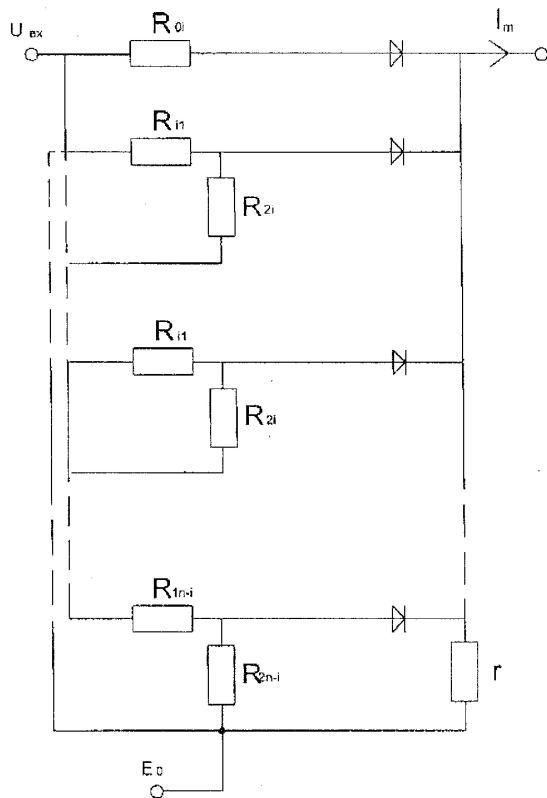


Рис.18.

Коли ж квадратор використовується в схемі добуткового блоку, то до нього підключається вхідна схема з деякими $\Gamma_{\text{ЭКВ}} \neq 0$.

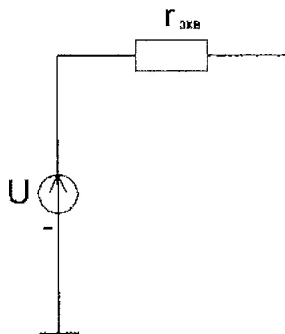


Рис. 19.

Отже, потрібно перерахування опорів квадратора, що б врахувати $\Gamma_{\text{СКВ}}$ джерела. Очевидно, що перераховані повинні бути R_{1i} . Для проведення перерахунку необхідно зауважити, що дана схема являє собою інверсне включення суматора напруг:

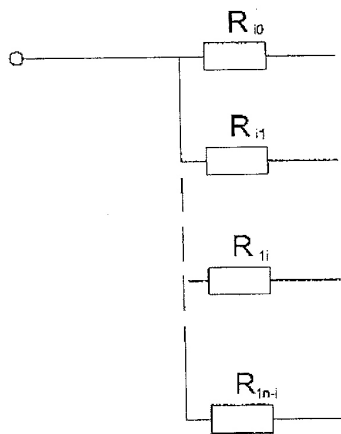


Рис.20.

$$R_{\text{экз}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{R_i}}$$

При підключенні $\Gamma_{\text{екв}}$ опору R_{ii} потрібно зменшити в s раз:

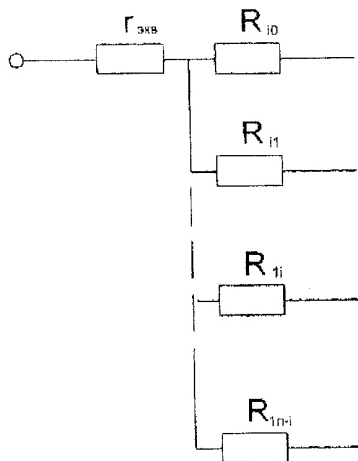


Рис.21.

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_{\sim \text{ЭКВ}} + r_{\text{ЭКВ}}$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{c}{R_{1i}}} = \frac{1}{c} \frac{1}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{R_{1i}}} = \frac{1}{c} R_{\text{ЭКВ}}$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_{\sim \text{ЭКВ}}}{c} + r_{\text{ЭКВ}}$$

$$c(R_{\text{ЭКВ}} - r_{\text{ЭКВ}}) = R_{\sim \text{ЭКВ}}$$

$$c = \frac{R_{\text{ЭКВ}}}{(R_{\text{ЭКВ}} - r_{\text{ЭКВ}})} = \frac{1}{1 - \frac{r_{\text{ЭКВ}}}{R_{\text{ЭКВ}}}}$$

5.6. Отримання розмножувального елемента з прямим струмовим виходом.

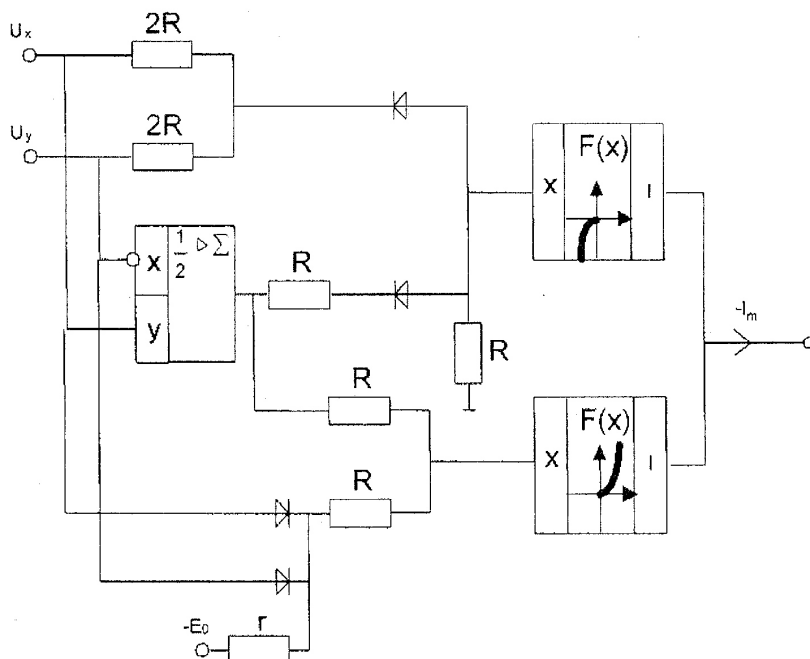
Як зазначалося раніше, МЭ з інверсним струмовим виходом реалізується на основі формули:

$$xy = -\frac{1}{4} \left[-(-|x+y|)^2 + |x-y|^2 \right]$$

Відповідно, для отримання МЭ з прямим струмовим виходом використовується наступне співвідношення:

$$xy = -\frac{1}{4} \left[-(-|x-y|)^2 + |x+y|^2 \right]$$

Відмінності в наведених формулах визначають ті зміни, які потрібно внести в схему МЭ з інверсним струмовим виходом щоб отримати МЭ з прямим струмовим виходом.



Ці зміни полягають у наступному:

1. На квадратор, який реалізує залежність $y = x$, потрібно по давати модуль суми вхідних напруг. Тому у верхньому каналі схеми треба виділити не мінус модуль, а модуль, що досягається прямим включенням діодів цього каналу замість зворотного. Сам же верхній канал необхідно підключити до нижнього квадратору.

2. На квадратор, який реалізує залежність $y = -x^2$, потрібно подавати мінус модуль різниці вхідних напруг. Тому нижній канал схеми перетвориться на основі формули:

$$\frac{1}{2}|x - y| = -\frac{1}{2}(x + y) + \max(x, y)$$

Як видно, тут необхідно схему виділення максимуму замінити на схему виділення мінімуму, що досягається зміною полярності напруги E_0 і зміною напрямку включення діодів в схемі виділення максимуму. Після цього нижній канал схеми під лягає до верхнього квадратору. Остаточню, Схема МЭ з прямим струмовим виходом набуває вигляду:

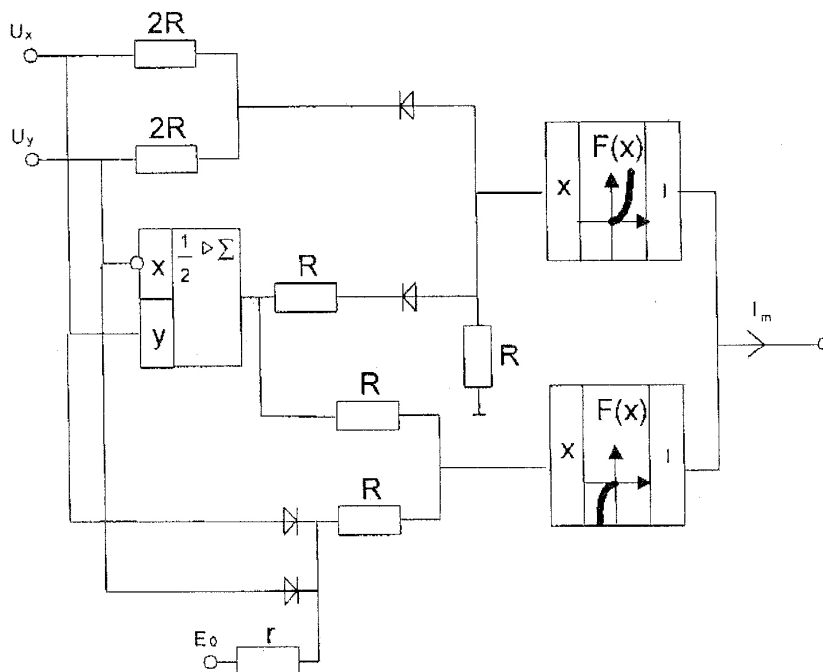


Рис.23.

5.7. Необхідні відомості про створення макросів в пакеті MicroCap.

У процесі виконання лабораторної роботи виникає необхідність переносити раніше створені схеми до складу інших, більш складних і об'ємних. Щоб полегшити це дію і додати велику наочність складними схемами, можна скористатися таким засобом пакета MicroCap, як макрос. Макроси дозволяють оформити створені користувачем схеми окремим бібліотечним елементом. Для цього необхідно виконати наступні дії:

1. Створити в графічному редакторі Shapeedit графічне представлення нового елемента (Елементи, необхідні для виконання даної лабораторної роботи вже створені).

2. Оформити спеціальним чином схему користувача.

3. Поставити у відповідність графічного представлення потрібну схему. У відношенні схем, використовуваних в даній лабораторній роботі в якості макросів, етапи 1 і 3 вже виконані. Отже, необхідно вміти оформляти схему, призначену для макросу, спеціальним чином. Таке оформлення увазі:

1. Збереження схеми під строго певним ім'ям.

2. Привласнення вхідним і вихідним висновків схеми певного тексту. В ході лабораторної роботи в кожному конкретному випадку вказуються ім'я, під яким має бути збережена схема, висновки і текст, який повинен бути присвоєний цим висновкам. Присвоєння тексту повинно бути зроблено строго певним чином. Це ілюструється прикладом. Припустимо, необхідно вхідному висновку схеми привласнити текст PIN1, а вихідному - PIN2.

Тобто відповідні висновки повинні бути досить довгими, а текст повинен знаходитися безпосередньо над виведенням і не виходити за його межі.