

*На правах рукопису*

УДК 621.3.049.77

КІЗЄЄВ Олександр Анатолійович

**МОНОЛІТНІ ШИРОКОПОЛОСНІ ДІЛЬНИКИ  
ЧАСТОТИ НВЧ ДІАПАЗОНУ З КОЕФІЦІЄНТОМ  
ДІЛЕННЯ 2 НА АРСЕНІДІ ГАЛІЯ**

Спеціальність 05.27.05 — «Інтегральні  
радіоелектронні пристрої»

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в науково-дослідному інституті «Сатурн» м. Києва.

Науковий керівник — доктор технічних наук, професор  
**Калніболотський Ю. М.**

Офіційні опоненти — доктор фізико-математичних наук  
**Чайка В. Є.,**

кандидат технічних наук, доцент  
**Москалюк В. О.**

Провідне підприємство указано в рішенні спеціалізованої ради.

Захист дисертації відбудеться « 21 » березня 1994 р.  
о 15 годині на засіданні спеціалізованої ради К 068.14.17  
Київського політехнічного інституту.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці науково-дослідного інститута «Сатурн».

Відзиви у двох примірниках з печаткою просимо направляти на ім'я вченого секретаря спеціалізованої ради за адресою: 252056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 39, КПІ.

Автореферат розіслано « 7 » лютого 1994 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради,  
кандидат технічних наук, доцент

**КОБЦЕВ Ю. Д.**

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00777789 (2)

## Загальна характеристика роботи

### **Актуальність проблеми.**

Дільники частоти (ДЧ) НВЧ діапазону широко застосовуються в системах фазової автоподстройки частоти (ФАПЧ) задаючих генераторів і гетеродинів приймачів, в синтезаторах частоти (СЧ), які є основою сучасних систем зв'язку, РЛС та РРЛ, вимірювачах частоти і в інших вимірювальних системах. ДЧ НВЧ діапазону, як правило, визначають діапазон робочих частот високоякісних генераторів сигналів вищезгаданих систем.

Необхідність зростання швидкості передачі інформації в область гігабітових потоків і зайнятість метрового та низькочастотної частини сантиметрового діапазону довжин хвиль сучасними радіоелектронними системами диктує необхідність розширення частотного діапазону сучасних систем зв'язку, РЛС та РРЛ в область одиниць та десятків гігагерц. Рішення цієї технічної задачі в значній мірі визначається наявністю в арсеналі розробника систем надшвидкодійчих широкополосних ДЧ НВЧ діапазону.

У зв'язку з вищезазначеним розробка широкополосних ДЧ НВЧ діапазону з коефіцієнтом ділення 2, відповідаючих комплексу підвищених вимог до електричних та експлуатаційних характеристик є важливою науково-технічною задачею. На важливість задачі створення широкополосних ДЧ НВЧ діапазону вказує велика кількість публікацій в зарубіжній літературі, велика кількість замовлень на широкополосні ДЧ НВЧ діапазону установ та організацій, які займаються розробкою сучасних радіоелектронних систем.

Задача розробки широкополосних ДЧ НВЧ діапазону з коефіцієнтом ділення 2 була поставлена в межах НДР і ДКР, які виконуються по Комплексним цільовим програмам України:

- 1) "Технологія на базі GaAs для НВЧ електронної техніки"
- 2) "Відтворення елементної бази для організації замкнутого циклу виробництва озброєння та військової техніки."

### **Ціль роботи**

Розвиток методології проектування широкополосних ДЧ НВЧ діапазону на рівні функціональних та електронних схем, розробка методик оцінки граничної та мінімальної бистротді ДЧ, методик схемотехнічної побудови функціональних елементів та ДЧ НВЧ

діапазону в цілому з урахуванням конструктивно-технологічних обмежень сучасної технології монолітних ІС та ПТШ на арсеніді галія.

#### **Основні задачі дослідження.**

Загальна науково-технічна задача роботи міститься в розробці методології проектування інтегральних схем монолітних широкополосних ДЧ СВЧ діапазону з коефіцієнтом ділення 2 на арсеніді галія, відповідаючих комплексу підвищених електричних та експлуатаційних вимог.

Для рішення загальної задачі вирішуються наступні наукові підзадачі:

1. Розробка наукової методики функціональної побудови широкополосних ДЧ НВЧ діапазону з коефіцієнтом ділення 2.

2. Розробка методики оцінки граничної бистроті широкополосного ДЧ НВЧ діапазону, створеного по розробленій функціональній схемі.

3. Розробка наукової методики синтезу електронної схеми широкополосного ДЧ НВЧ діапазону з коефіцієнтом ділення 2.

4. Розробка методики схемотехнічної побудови функціональних елементів ІС монолітних широкополосних ДЧ НВЧ діапазона на основі польових транзисторів Шоткі (ПТШ) з урахуванням конструктивно-технологічних обмежень монолітних ІС на арсеніді галія.

5. Розробка методики схемотехнічної побудови ІС широкополосного ДЧ НВЧ діапазону з коефіцієнтом ділення 2 з урахуванням конструктивно-технологічних обмежень монолітних ІС на арсеніді галія.

6. Розробка методики оцінки мінімальної робочої частоти ДЧ НВЧ діапазону.

7. Розробка та дослідження монолітних широкополосних ДЧ НВЧ діапазону з коефіцієнтом ділення 2 на основі ПТШ на арсеніді галія з підвищеними характеристиками комплексу електричних та експлуатаційних параметрів.

#### **Методи досліджень.**

В роботі використані методи теорії множин, методи теорії нечітких множин, методи теорії графів, методи машинного моделю-

вання електричних ланцюгів. Основні теоретичні результати роботи підтверджені моделюванням на ЕОМ типу IBM PC, порівнянням розрахункових та експериментальних даних, дослідженням експериментальних та дослідних зразків ДЧ НВЧ діапазону.

#### **Наукова новизна роботи.**

1. Розроблена методика синтезу структурної схеми широкополосних ДЧ НВЧ діапазону на основі загальної теорії синтезу електронних схем з застосуванням теорії множин і теорії графів.
2. Розроблена наукова методика синтезу електронних схем широкополосних ДЧ НВЧ діапазону на основі теорії нечітких множин та теорії графів.
3. Розроблена методика оцінки граничної та максимальної швидкодії ДЧ та отримані загальні аналітичні вираження для оцінки максимальної та мінімальної робочих частот широкополосного ДЧ НВЧ діапазону.
4. Розроблена методика схематичної побудови функціональних елементів та широкополосного ДЧ НВЧ діапазону в цілому на основі ПТШ з урахуванням конструктивно-технологічних обмежень монолітних ІС на арсеніді галія.

#### **Практична цінність.**

1. Розроблена методологія проектування широкополосних ДЧ НВЧ діапазону на основі ПТШ на арсеніді галія, відповідаючих комплексу підвищених електричних та експлуатаційних вимог.
2. На основі методології розроблені, виготовлені та експериментально досліджені ІС широкополосних ДЧ в діапазоні 0,25...4,0 и 4...8 ГГц, які по комплексу параметрів не мають вітчизняних аналогів. По комплексу параметрів розроблені ІС ДЧ НВЧ діапазону з коефіцієнтом ділення 2 не поступаються ДЧ НВЧ діапазону, які випускаються провідними зарубіжними фірмами Японії, США, Литви в заданих діапазонах частот.

#### **Реалізація і упровадження наукових результатів.**

Результати роботи використані у трьох науково-дослідних двох-дослідно-конструкторських роботах, які виконані та виконуються в теперішній час в НДІ "Сатурн" м. Київ в межах Комп-

лексних цільових програм України.

#### **Апробація роботи.**

Результати роботи доповідались на ряді науково-технічних семінарів НТТРЕС ім. Попова ( м. Севастополь, м. Ленінград 1988 - 1992 р. ), а також на двох Всесоюзних науково-технічних конференціях ( м. Звенигород, 1984 та м. Київ, 1990 р. )

#### **Публікації.**

Основні результати досліджень опубліковані в восьми друкованих роботах та двох звітах про науково-дослідні роботи.

#### **Об'єм та структура роботи.**

Дисертаційна робота викладена на 177 сторінках машинописного тексту. Робота складається з чотирьох глав, заключення, 14 додатків та списку літератури, який вклучас 54 найменування.

#### **В дисертаційній роботі захищаються:**

1. Наукова методика синтезу функціональної схеми широкополосного ДЧ НВЧ діапазону з коефіцієнтом ділення 2.
2. Наукова методика синтезу електронної схеми широкополосного ДЧ НВЧ діапазону з коефіцієнтом ділення 2.
3. Методика оцінки найбільшої швидкодії ІС широкополосного ДЧ НВЧ діапазону, створеного по розробленій функціональній схемі.
4. Методика схемотехнічної побудови функціональних елементів ІС широкополосного ДЧ НВЧ діапазону на основі ПТШ на арсеніді галія з урахуванням конструктивно-технологічних обмежень монолітних ІС на арсеніді галія.
5. Методика схемотехнічної побудови функціональних елементів ІС широкополосного ДЧ НВЧ діапазону з коефіцієнтом ділення 2 з урахуванням конструктивно-технологічних обмежень монолітних ІС на арсеніді галія.
6. Методика оцінки мінімальної робочої частоти ДЧ НВЧ діапазону.
7. Схеми широкополосних ДЧ НВЧ діапазону в діапазоні частот до 8 ГГц на основі ПТШ на арсеніді галія.

### Зміст роботи.

В першій главі обговорюється актуальність постановки задачі створення широкополосних ДЧ НВЧ діапазону для застосування в системах ФАПЧ задаючих генераторів, гетеродинів приймачів, СЧ сучасних радіоелектронних систем зв'язку та локації. Аналізується стан розробок ДЧ НВЧ діапазону провідних зарубіжних фірм, методи їх побудови та технологія виготовлення, основні досягнуті параметри. Виходячи з вимог радіоелектронних систем та сучасного стану технології створення ІС на арсеніді галія формулюються технічні вимоги до широкополосних ДЧ НВЧ діапазону. На закінчення глави на основі технічних вимог сформульовані ціль роботи, основна науково-технічна задача та її подзадачі.

В другій главі розглянута методика синтезу функціональної та електронної схеми ДЧ НВЧ діапазону. Синтез функціональної схеми ДЧ НВЧ діапазону включає до себе наступні основні етапи:

Етап 1. Визначення множин заданих та результуючих перемінних пристроїв  $\mathcal{B}_x$  і  $\mathcal{B}_y$ .

Етап 2. Виділення функціональної частини технічного завдання (ТЗ).

Етап 3. Визначення часткових задач та відповідних часткових алгоритмів технічного завдання (ЧАТЗ).

Етап 4. Визначення множин входних та вихідних перемінних кожного ЧАТЗ  $\mathcal{B}_x \ell$  і  $\mathcal{B}_y \ell$  ( $\ell = 1, 2, \dots, L$ ).

Етап 5. Синтез алгоритму функціонування на рівні ЧАТЗ.

Етап 6. Аналіз і класифікація елементів множин  $\mathcal{B}_x \ell$  і  $\mathcal{B}_y \ell$  ( $\ell = 1, 2, \dots, L$ ).

Етап 7. Синтез ЧАТЗ.

Етап 8. Оцінка додаткових вимог, які не входять в функціональну частину ТЗ. Якщо ці вимоги не задовільняються, то повертається до етапу 6 та виконують коректировку класифікації елементів множин  $\mathcal{B}_x \ell$  і  $\mathcal{B}_y \ell$  для деяких значень  $\ell$ .

Етап 9. Оцінка якості алгоритму функціонування. Звичайно етап 9 зводиться до вираховування цільової функції, яка залежить

від якості часткових алгоритмів. Якщо цільова функція досягає екстремума процес синтезу алгоритма закінчується. В протилежному випадку проводиться повернення до етапу 6 і корективна класифікація елементів множин  $\check{\text{В}}_x \ell$  і  $\check{\text{В}}_y \ell$  для деяких значень  $\ell$ .

На першому етапі синтезу із загального переліку величин, характеризуючих сигнали, параметри та характеристики пристрою, виділяються такі величини, які можуть бути віднесені до заданих та результуючих перемінних проектуемого ДЧ НВЧ діапазону. Так формуються множини  $\check{\text{В}}_x$  та  $\check{\text{В}}_y$ .

На другому етапі синтезу із загального переліку вимог, які пред'являються до пристрою, виділяються ті, за допомогою яких виконується синтез функціональної схеми пристрою. Вони складають функціональну частину ТЗ (ФЧТЗ) і в текстовій, графічній, формалізованій або змішаній формі визначають комплекс запитань переробки, збереження, передачі та відображення інформації, для виконання яких призначена проектуема схема. Ця частина ТЗ пов'язана з запитаннями перетворення сигналів.

Змістом третього етапу синтезу є подання вимог ФЧТЗ у вигляді множин  $Z = \{Z_\ell\}$  ( $\ell = 1, 2, \dots, L$ ) окремих (часткових) задач, які повинні бути вирішені спроектованим пристроєм. Цій множині ставиться у відповідність ізоморфна множина часткових алгоритмів  $A = \{A_\ell\}$  ( $\ell = 1, 2, \dots, L$ ) технічного завдання ЧАТЗ, кожний з яких забезпечує виконання відповідної часткової задачі. Розподіл загальної сукупності вимог та правил ФЧТЗ на часткові задачі та ізоморфні до них алгоритми дозволяє на четвертому етапі синтезу зв'язати з кожним частковим алгоритмом  $A_\ell$  пару множин його початкових та результуючих перемінних  $\check{\text{В}}_x \ell$  і  $\check{\text{В}}_y \ell$ . Таким чином множині  $A$  ставиться у відповідність система пар множин  $\{(\check{\text{В}}_x \ell, \check{\text{В}}_y \ell)\}$ .

На п'ятому етапі здійснюється синтез шуканого алгоритму функціонування на рівні часткових алгоритмів ТЗ. Цей процес складається з побудови графа, в якості вершин якого використовуються окремі ЧАТЗ  $A_\ell \in A$ . Граф будується в ярусно-паралельній формі, в якій належність деякого часткового алгоритму  $A_\ell$  множині часткових алгоритмів першого ярусу  $A_1$  визначається умовою  $\check{\text{В}}_x \ell \subseteq \check{\text{В}}_x$ . Для належності  $A_\ell$  множині

часткових алгоритмів другого ярусу повинні виконуватися умови

$$\check{\Theta}_{\text{ВХ}} \subseteq \{ \check{\Theta}_{\text{ВХ}}, \check{\Theta}_{\text{ВХ}}_{\text{A}_1} \},$$

де  $\check{\Theta}_{\text{ВХ}}_{\text{A}_1}$  - об'єднання множин результуючих перемінних ЧАТЗ, які належать до першого ярусу шуканого графу. В загальному випадку умова належності ЧАТЗ і-тому ярусу має вид:

$$\check{\Theta}_{\text{ВХ}} \subseteq \{ \check{\Theta}_{\text{ВХ}}, \check{\Theta}_{\text{ВХ}}_{\text{A}_1}, \dots, \check{\Theta}_{\text{ВХ}}_{\text{A}_{i-1}} \}.$$

Таким чином встановлюється належність кожного ЧАТЗ деякому ярусу графа.

Змістом шостого етапу синтезу функціональної схеми ДЧ є аналіз множин  $\check{\Theta}_{\text{ВХ}}$  та  $\check{\Theta}_{\text{ВХ}}_{\text{A}_i}$  і виконання класифікації їх елементів за принципом належності деякої підмножини перемінних електронних схем. Основою для проведення такої класифікації служить структура множин заданих та результуючих перемінних. Основними класами перемінних множин  $\check{\Theta}$  є: а) сигнальні перемінні; б) параметричні перемінні; в) сигнально-параметричні перемінні; г) компонентні перемінні.

На сьомому етапі синтезу алгоритму функціонування ДЧ виконується реалізація ЧАТЗ, які входять до складу операторних вершин графа. Ісходними даними для синтезу ЧАТЗ є:

- а) множини вхідних та вихідних перемінних встановлених класів  $\check{\Theta}_{\text{ВХ}}(\cdot)$  і  $\check{\Theta}_{\text{ВХ}}_{\text{A}_i}(\cdot)$ , де числа в круглих дужках показують кількість перемінних розглянутої множини;
- б) множина реалізуемих алгоритмів

$$\check{A}_p = \{ \check{\Theta}_{\text{A}_{i1}}(\cdot) \Rightarrow \check{\Theta}_{\text{A}_{i2}}(\cdot) \};$$

де  $\check{\Theta}_{\text{A}_{i1}}(\cdot)$  і  $\check{\Theta}_{\text{A}_{i2}}(\cdot)$  - множини вхідних та вихідних перемінних реалізуемого алгоритма  $A_i$ .

- в) множина реалізуемих функціональних операторів

$$\check{F}_f = \{ (\check{\Theta}_{f1}(\cdot) \Rightarrow \check{\Theta}_{f2}(\cdot)) \},$$

де  $\check{\Theta}_{\Phi 1_1}(\cdot)$  та  $\check{\Theta}_{\Phi 1_2}(\cdot)$  - множини вхідних та вихідних перемінних реалізуемого функціонального оператора  $F_1$ .

г) множина умов функціонування реалізуемих алгоритмів, операторів та шуканого ЧАТЗ

$$F_1 = \left\{ \left( \check{\Theta}_{\Lambda 1_1}(\cdot) \begin{matrix} \nearrow \\ \searrow \end{matrix} \begin{matrix} \check{\Theta}_{\Lambda 1_2}^{(i)}(\cdot) \\ \check{\Theta}_{\Lambda 1_2}^{(o)}(\cdot) \end{matrix} \right) \right\},$$

де  $\check{\Theta}_{\Lambda 1_1}(\cdot)$  - множина вхідних перемінних, а  $\check{\Theta}_{\Lambda 1_2}^{(i)}(\cdot)$  та  $\check{\Theta}_{\Lambda 1_2}^{(o)}(\cdot)$  множини вихідних перемінних, відповідних істинності та помилковості оператора логіки  $F_1$ .

Формалізовані методи синтезу ЧАТЗ зводяться до розробки системи правил побудови графа  $G_{Ac}$ , де в якості вершин у ньому використовуються алгоритми  $A_i$ . Алгоритм побудови графа складається з наступного:

На основі властивості частковості природних та допустимих операцій для кожного  $i$ -того та  $j$ -того ( $i \neq j$ ) реалізуемого алгоритма и оператора будується система пар перехрещених множин, відповідних областям ви́значення перемінних однакових класів. В результаті маємо множину  $N$ , елементи якої складаються в пар:

$$\{ \check{\Theta}_{(i)1_1}(\cdot), \check{\Theta}_{(j)1_1}(\cdot) \mid \check{\Theta}_{(i)1_2}(\cdot) \cap \check{\Theta}_{j1_2}(\cdot) \neq \emptyset \};$$

$$\{ \check{\Theta}_{\Lambda 1_1}(\cdot), \check{\Theta}_{(j)1_1}(\cdot) \mid \check{\Theta}_{\Lambda 1_2}^{(i)}(\cdot) \cap \check{\Theta}_{(j)1_2}(\cdot) \neq \emptyset \}$$

За допомогою множин  $\check{A}_p$ ,  $\check{F}_f$ ,  $\check{F}_l$  та  $\check{N}$  будується направлений граф відображень  $G_{Ac}^*$ , вершинами якого є  $\check{\Theta}_{(i)1_1}(\cdot)$ ,  $\check{\Theta}_{(i)1_2}(\cdot)$ ,  $\check{\Theta}_{\Lambda 1_2}^{(i)}(\cdot)$ , а гілками поєднуються пари відповідних вершин  $(\check{\Theta}_{(i)1_1}(\cdot), \check{\Theta}_{(i)1_2}(\cdot))$  або  $(\check{\Theta}_{(i)1_2}(\cdot), \check{\Theta}_{\Lambda 1_2}^{(i)}(\cdot))$  та направлені від  $\check{\Theta}_{(i)1_1}(\cdot)$  до  $\check{\Theta}_{(i)1_2}(\cdot)$ , якщо пара належить множинам  $\check{A}_p$ ,  $\check{F}_f$  чи  $\check{F}_l$ , і навпаки, якщо пара належить множині  $\check{N}$ . В першому випадку вага гілки дорівнює  $A_i$ ,  $F_1$  чи  $F_1^*$  в залежності від належності до вказаних множин, а в другому випадку - одиниці.

Далі на графі відображення добудовуються вершини та гілки другого типу, відповідні вхідним перемінним ЧАТЗ, шляхом доповнення множини  $\check{H}$  парами:

$$H_{vx} = \{ \check{\theta}_{0xk}(\cdot), \check{\theta}_{0)iz}(\cdot) | \check{\theta}_{0xk}(\cdot) \cap \check{\theta}_{0)iz}(\cdot) \neq \emptyset \}$$

причому  $\check{\theta}_{0)iz}(\cdot) \in (\check{A}p, \check{F}\phi, \check{F}l)$ , а  $\check{\theta}_{0xk}(\cdot)$  відповідає вхідним перемінним ЧАТЗ  $k$ -го класу. Обирається деяка вихідна перемінна  $\check{\theta}_{0xk}$ ; і на графі відображень додається відповідна їй вершина, а також гілка другого типу. Це еквівалентно доповненню  $\check{H}$  парю з множини

$$H_{vix} = \{ (\check{\theta}_{0)iz}(\cdot), \check{\theta}_{0xkk}(\cdot) | \check{\theta}_{0)iz}(\cdot) \cap \check{\theta}_{0xkk}(\cdot) \neq \emptyset \},$$

де  $\check{\theta}_{0)iz}(\cdot) \in (\check{A}p, \check{F}\phi)$ ,  $\check{\theta}_{0xkk} \in \check{\theta}_{0xkk}(\cdot)$ .

Далі на графі відображень відшукується такий шлях із деякої вхідної вершини в вихідну, у якій для кожної гілки порівняні потужності (кількості елементів) множин відповідній їй парі. Якщо такий шлях відсутній, тоді відшукується совокупність шляхів із вхідних вершин у вихідну з рівними потужностями множин. Згідно з знайденим шляхом (або совокупністю шляхів) графа відображень будується фрагмент шуканого графа ЧАТЗ.

Розглянутий процес повторюється для всіх вихідних перемінних синтезаусмого ЧАТЗ.

Після синтезу алгоритмів функціонування на рівні ЧАТЗ здійснюється побудова функціональної схеми ДЧ. Для цього на підмножині вершин  $V_A$  графа  $G_{A\lambda}$ , які відповідають часковим алгоритмам і операторам логіки запроваджується відношення належності одному блоку структурної схеми  $R_A$ . В результаті множина  $V_A$  перетворюється в фактор-множину  $V_A/R_A$  по відношенню до  $R_A$ . Таке розстрошування множини  $V_A$  характеризується обраними представниками (еталонними критеріями) в кожному класі еквівалентності. Як еталони використовують я наступні критерії об'єднання  $A1$  и  $F1$  в блок:

- а) наявність однакою совокупності перемінних, поз'яваних деякими  $A1$  та  $F1$ ;
- б) наявність ділянок об'єднання або добутку окремих  $A1$  та

Гі, які входять до складу реалізуемого блока;

в) наявність у складі одного реалізуемого блока декількох ЧАТЗ.

Приведені вище етапи були використані при розробці функціональних елементів ДЧ и функціональної схеми ДЧ НВЧ діапазону вцілому. Розроблені схеми функціональних елементів та функціональна схема ДЧ НВЧ діапазону вцілому.

У другій главі розглянуто алгоритм функціонування ДЧ НВЧ діапазону та походючи з загальних припущень сформульовані вимоги та отримані аналітичні вираження, які визначають максимальну швидкість ДЧ НВЧ діапазону.

З аналізу умов монтажу і з урахуванням теплового опору конструкції сформульовані вимоги з енергоспоживання окремих функціональних елементів (ФЕ) та ДЧ НВЧ діапазону вцілому.

На закінчення другої глави приведена методика синтезу електронної схеми ДЧ НВЧ діапазону. Як існуюча інформація для утворення методики використана наступна інформація: розроблена структурна схема, сформульовані вимоги з швидкості та енергоспоживання для ДЧ НВЧ діапазону вцілому та його ФЕ, множину, яка містить інформацію про параметри та характеристики ФЕ, які входять до структурної схеми ДЧ. Ця множина розподілена на ряд неперехрещених множин, в кожному з яких утримується інформація про узли, які підібрані по функціональному признаку.

Припустимо, що швидкість ФЕ структурної схеми ДЧ не залежать один від одного, а їх числові значення лежать в допустимих інтервалах. Таким чином, можна вказати ступінь віддачі переваги вибору значень в цих інтервалах, таким чином відношення порядку вводиться у інтервал допустимих значень.

Як відношення порядку введемо наступне правило: значення затримки у вказаному інтервалі треба вибирати як можна меншим.

Нехай для структурної схеми ДЧ НВЧ діапазону маємо інформацію для кожного ФЕ о  $N_j$  варіантах його виконання, де  $j$  - кількість ФЕ в структурній схемі. Необхідно визначити для кожного ФЕ такий варіант виконання, щоб структурна схема вцілому найкращим образом відповідає ТЗ на ДЧ НВЧ діапазону. З абідь-

шенням кількості ФЕ і варіантів їх виконання значно зростає час пошуку необхідного рішення. Визначим алгоритм, який дозволяє виконати пошук необхідного рішення ціленаправлено.

Поставимо у відповідь до кожного варіанту виконання будь-якого ФЕ єдину вершину графа. Дві вершини графа з'єднані між собою, коли відповідні їм ФЕ з'єднані між собою. Кількість вузлів графа дорівнює кількості варіантів виконання ФЕ, помножене на кількість ФЕ в структурній схемі. Припишемо кожній дузі графа деяке додатне число  $\rho_{ij}$  - вартість з'єднання, причому чим краще погоджуються відповідні характеристики і-того варіанту  $j$ -того ФЕ з вхідними характеристиками  $k$ -того варіанту  $(j+1)$ -го ФЕ та спільні характеристики такого з'єднання краще відповідають ТЗ на ДЧ НВЧ діапазону, тим менше буде значення  $\rho_{ij}$ . В цьому випадку задача синтезу електронної схеми ДЧ НВЧ діапазону формулюється як задача оптимізації на графах, таким чином пошук шляху або шляхів від початку графа до його кінця з оптимальним значенням вартості  $\sum \rho_{ij}$ . Побудова числової функції на графі є проблемою многокритеріального вибору альтернатив, які мають оцінки по деяким критеріям. Розглядаючи послідовно альтернативи по кожному критерію і представити її крапкою в  $n$ -мірному просторі. Для визначення оптимальної альтернативи необхідно ввести в заданий простір відношення порядку.

В загальному виді функція рішення записується наступним образом:

$$D = A_1^{A_1} \cap A_2^{A_2} \cap A_3^{A_3} \dots A_n^{A_n} \quad (1)$$

де  $A_i$  - множина альтернатив, відповідаючих  $i$ -ої цілі;

$A_i$  - важливість  $i$ -ої цілі. Відповідно до функції рішення (1) будується відображення її в числову функцію  $f$ , яку в загальному виді можна записати так

$$f = \bigotimes_{i=1}^n \varphi_i(z_i) \quad (2)$$

де  $\bigotimes$  - бінарная операція "агортки";  $Z_i$  - численне значення  $i$ -ої цілі з ТЗ;  $\varphi_i(Z_i)$  - функція приведення численого значення  $i$ -ої цілі до єдиної шкали цілей, вказаних у ТЗ. Функцію  $f$  необхідно будувати таким чином, щоб можна було отримати числову характе-

ристку на проміжкових етапах синтезу, тобто на етапі з'єднання електронних вузлів. Тоді загальний вид функції буде мати вид:

$$f = \bigoplus_{j=1}^m \bigoplus_{i=1}^n \psi_i^j(z_i^j) \quad (3)$$

де  $\bigoplus, \bigodot$ - операції "згортки", які в загальному випадку можуть рівнитися між собою;  $Z_i$  - числене значення  $i$ -ої цілі на  $j$ -тому рівні графа;  $\psi_i^j(z_i^j)$  - функція приведення численого значення  $i$ -тої цілі до єдиної шкали на  $j$ -тому рівні графа. Таку побудову функції  $f$  можна виконати тільки за допомогою емпіричної інформації по кожному класу ФЕ структурної схеми.

Розглянемо процес декомпозиції цілей ТЗ по рівням шуканого графа. Як правило для деякої електронної схеми і ДЧ також, можна побудувати і побудовані аналітичні залежності, за допомогою яких кінцеве значення цілі в числовій формі відбивається через відповідне значення електронних вузлів, відзначених вершинами у графі. Але точне числове значення, яке може відповідати даній вершині визначити важко, можна тільки вказати, виходячи з емпіричного досвіду, довіркові інтервали, яким вона може належати, тобто зразкове процентне відношення вкладу  $i$ -го варіанту ФЕ в  $j$ -у ціль ТЗ. На основі емпіричного досвіду вказується і відношення порядку в даному довірковому інтервалі. Таким чином процес декомпозиції можна виразити так:

$$Z_1 = \bigoplus_{i=1}^m z_1^i; \quad Z_2 = \bigoplus_{i=1}^m z_2^i; \quad \dots; \quad Z_n = \bigoplus_{i=1}^m z_n^i, \quad (4)$$

де  $Z_i, z_i^j$  - нечіткі підмножини множини цілей з функціями належності  $f_{Z_i}$  та  $f_{z_i^j}$ ;  $\bigoplus$  - операція "згортки"; причому для різних цілей вони мають різний вид;  $m$  - кількість рівней графа (кількість ФЕ).

Кожний варіант виконання електронного вузла описується набором характеристик, які аналогічні цілям ТЗ. Причому деяка характеристика подається не точним значенням, а у виді нечіткої підмножини. Бводячи поняття довіркового інтервалу, в якому лежить значення характеристики електронного вузла та відносячи ці

значення до ідеального значення, яке може бути досягнуто в цьому ФЕ, приходимо до побудови функції належності цієї нечіткої множини. Таким чином результируюча нечітка підмножина по  $i$ -ої цілі на  $j$ -ому рівні шуканого графа визначається наступним чином:

$$\begin{cases} \theta_{i,j}^j = z_{i,j}^j \cap Q_{i,j}^j \cap S_{i,j}^{j+1} \\ \theta_i^j = z_i^j \cap Q_i^j \cap S_i^{j+1} \end{cases} \quad (5)$$

где  $\theta_i^j$  - результируюча нечітка підмножина на  $j$ -тому рівні графа;  $Q_i^j$  - нечітка підмножина, відповідна  $i$ -ої підцілі на  $j$ -тому рівні графа;  $S_i^{j+1}$  - нечітка підмножина, відповідна  $i$ -ої входної характеристики  $(j+1)$ -го рівня графа.

Для визначення числової функції на дугах графа використаємо векторно-простіркових підходів. Поставимо у відповідь кожній вершині графу вектор, елементами якого є функції належності різних цілей

$$V_k^j = [R_{1,k}^j(x); R_{2,k}^j(x); \dots; R_{n,k}^j(x)]^T \quad (6)$$

где  $V_k^j$  -  $k$ -ий варіант ФЕ на  $j$ -ом рівні графа;  $R_{i,k}^j(x)$  - функція належності  $k$ -го варіанту ФЕ на  $j$ -тому рівні  $i$ -ої цілі;  $T$  - операція транспонування. При такому підході використаємо  $L_p$ -моделі

$$d(L_p, R_i^j) = L_p = \left( \sum_{i=1}^n (A_i^j(x) - R_i^j(x))^p \right)^{1/p} \quad (7)$$

де  $A(x)$  - лінійна функція належності. Величина  $p = \text{const}$ , причому чим вище  $p$ , тим менше є компенсаційних зв'язків між ними. За допомогою співвідношення (7) будуватиметься числова функція вартості оптимізації ФЕ структурної схеми.

Приведений вище алгоритм був використаний при синтезі електричної схеми ДЧ НВЧ діапазону. Відбір ФЕ для побудови ДЧ НВЧ діапазону проведений по двом цілям - швидкодії та енергопостачанню. Виходячи з сформульованих вимог з швидкодії та енергопостачання ФЕ до розгляду включені два варіанти виконання фазообертача, два варіанти виконання інвертора, два варіанти виконання першого електронного ключа. Аналіз, виконаний з використанням вищеприведеного алгоритму, показав, що для ДЧ в діапазоні до 4 ГГц найбільш природно використати наступні

варіанти виконання ФЕ: фазообертач в монолітному виконанні; інвертор в схемотехнічному базисі буферизованої логіки; перший електронний ключ на основі одного транзистора.

На основі запропонованого алгоритму проведено ціленаправлений відбір варіантів виконання ФЕ ДЧ НВЧ діапазону в діапазоні до 8 ГГц. Проведений аналіз показав, що на відміну від схеми ДЧ в діапазоні частот до 4 ГГц в цьому випадку найбільш оптимальним є вибір фазообертача в гібридному виконанні.

Відібрані відповідно з запропонованою методикою варіанти схемотехнічних рішень ФЕ ДЧ були використані при розробці електричних схем дільників частоти НВЧ діапазону з робочими частотами 0,25...4,0 ГГц та 4...8 ГГц.

В третій главі приведена методика проектування ФЕ і ДЧ НВЧ діапазону зцілому з урахуванням конструктивно-технологічних обмежень сучасної технології монолітних ІС на арсеніді галія на основі ПТШ і обмежень з енергопостачання. Приведен спосіб урахування смкостей транзисторної структури та елементів разводки монолітних ІС. Проведен аналіз схемотехнічного базису буферизованої логіки та спосіб вибору геометричних розмірів ПТШ у складі інвертора та фазообертача. Описан спосіб визначення геометричних розмірів ПТШ у складі електронних аналогових ключів. Приведен метод проектування схем ланцюгів погодження та зміщення ДЧ. Приведена методика оцінки мінімальної робочої частоти ДЧ НВЧ діапазону.

На основі спроектованих ФЕ та проведених досліджень розроблені і виготовлені дослідні зразки та експериментальні зразки широкополосних ДЧ НВЧ діапазону, які відповідають комплексу підвищених вимог з електричних та експлуатаційних характеристик.

Проведені дослідження та отримані результати підтверджують вірність окремих методик синтезу функціональної і електронних схем та її елементів і практичну ефективність запропонованої методології проектування ІС широкополосних ДЧ НВЧ діапазону. Розроблені методики синтезу функціональної та електронної схеми ДЧ НВЧ діапазону і оцінки її граничної швидкодії інваріантні у відношенні до елементного базису і можуть бути використані для створення більш високочастотних ДЧ з коефіцієнтом ділення 2 на будь-якій елементній базі. Розроблені методики

схемотехнічної побудови функціональних елементів та ІС ДЧ НВЧ діапазону зцілому з урахуванням конструктивно-технологічних обмежень сучасної технології ІС на основі ПТШ на арсеніді-галія і оцінки мінімальної робочої частоти ДЧ інваріантні до структури ПТШ і можуть бути використані при створенні більш високочастотних ДЧ на основі технології ІС середнього ступеня інтеграції на основі більш високочастотного активного елемента з довжиною затвора 0,2...0,3 мкм або ПТ з підвищеною рухомістю носіїв (НЕМТ-структури).

В додатку 1 приведена таблиця яка містить функції належності ФЕ, сумарні функції належності, довіркові інтервали та ваги дуг шуканого графа, використаного при синтезі функціональної схеми широкополосного ДЧ НВЧ діапазону.

У додатку 2 приведено аналітичний опис моделі ПТШ великого сигналу, яка була використана для аналізу схемотехнічного рішення ФЕ та ДЧ НВЧ діапазону зцілому в часовій та частотній областях.

В додатку 3 приведен перелік та величини параметрів моделі ПТШ великого сигналу з пороговою напругою -1,5 та -2,0 В.

У додатку 4 приведені S-параметри ПТШ різної конфігурації, які отримані експериментальним шляхом.

В додатку 5 приведені параметри еквівалентної схеми входу ПТШ, які отримані на основі S-параметрів, які приведені у додатку 4.

В таблиці додатку 6 приведена залежність величин та від співвідношення геометричних розмірів ПТШ в схемі ФЕ. Ці величини використані для оцінки мінімальної робочої частоти ДЧ.

В таблиці додатку 7 приведено перелік параметрів схеми електричної принципової ІС широкополосного ДЧ НВЧ діапазону.

У додатку 8 приведені топології двох кристалів ДЧ НВЧ діапазону в діагонах частот 0,25...4,0 та 4...8 ГГц.

В додатку 9 приведені розрахункові часові діаграми роботи ДЧ НВЧ діапазону на частотах 1,2,3 та 4 ГГц.

У додатку 10 приведені розрахункові часові діаграми роботи ДЧ на частотах 5,6,7 та 8 ГГц.

В додатку 11 показані фотографії експериментальних осцилограм вхідного та вихідного сигналів ДЧ НВЧ діапазону на час-

тотах 1, 2, 3 та 4 ГГц.

У додатку 12 показані фотографії експериментальних осцилограм вхідного та вихідного сигналів ДЧ НВЧ діапазону на частотах 6,7 та 8 ГГц.

В додатку 13 приведені фотографії мікросхем ДЧ в діапазоні частот 0,25...4,0 та 4...8 ГГц.

У додатку 14 приведен акт впровадження результатів дисертаційної роботи.

### Основні результати роботи та їх значення.

1. Запропонована методологія проектування монолітних широкополосних ДЧ НВЧ діапазону з коефіцієнтом ділення 2 на арсеніді галія, які відповідають комплексу підвищених технічних та експлуатаційних вимог.

2. Розроблена методологія синтезу функціональної схеми широкополосного ДЧ НВЧ діапазону на основі теорії множин та теорії графів.

3. Розроблена наукова методологія синтезу електричних схем широкополосних ДЧ НВЧ діапазону з застосуванням теорії нечітких множин та теорії графів.

4. Розроблена методика схемотехнічної побудови функціональних елементів ІС ДЧ НВЧ діапазону на основі ПТШ з урахуванням конструктивно-технологічних обмежень монолітних ІС на арсеніді галія.

5. Розроблена методика схемотехнічної побудови монолітних ІС широкополосного ДЧ НВЧ діапазону з урахуванням конструктивно-технологічних обмежень монолітних ІС на арсеніді галія.

6. Розроблена методика оцінки мінімальної робочої частоти широкополосного ДЧ НВЧ діапазону на основі ПТШ на арсеніді галія.

7. Виконана розробка схем, розрахунків, теоретичні та експериментальні дослідження широкополосних ДЧ НВЧ діапазону на основі ПТШ на арсеніді галія в діапазонах частот 0,25...4,0 ГГц та 4...8 ГГц, відповідаючих комплексу підвищених вимог з електричних та експлуатаційних вимог.

Запропоновані методики синтезу функціональної, електронної схем широкополосного ДЧ НВЧ діапазону та оцінки його гра-

ничної швидкодії інваріантні по відношенню до елементної бази і можуть бути використані для побудови широкополосних ДЧ НВЧ діапазону на другий більш швидкодіючий елементній базі.

Розроблені методики схемотехнічної побудови функціональних елементів ДЧ НВЧ діапазону та ДЧ цілому на основі ПТШ на арсеніді галія інваріантні по відношенню до структури ПТ і можуть бути використані при проектуванні більш швидкодіючих широкополосних ДЧ на ПТШ з проектними нормами 0,2...0,3 мкм або на ПТ НЕМТ-структуру.

По матеріалам дисертації опубліковані наступні основні роботи.

1. Кизеев А. А., Резник И. Т., Ильин И. Ю. Научно-технический отчет по НИР " Разработка ММС делителя частоты с коэффициентом деления 2 (4) в диапазоне частот 1...5 ГГц ", шифр " Элерон - 1 " - Киев. Библиотека НИИ "Сатурн", инв. N 2410, 1989 - с.168.

2. Кизеев А. А., Цыба А. В., Постоенко В. Г., Бураченко В. И., Лытова Т. Н., Шабанов А. Н. Научно-технический отчет по НИР " Исследование путей создания спецпроцессоров параллельной обработки сложных многофункциональных сигналов ", шифр "Эбеко". - Киев. Библиотека НИИ "Сатурн" инв. N 1053; 1990. - с.220.

3. Семенко А. И., Симаков В. А., Кизеев А. А. Делитель частоты с переменным коэффициентом деления для систем ФАПЧ / Электроника СВЧ: Тезисы докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. - Звенигород, 1984 - с. 35-40.

4. Кизеев А. А., Курванов С. А., Резник И. Т. Микросхема делителя частоты СВЧ диапазона / Изв. вузов. Радиоэлектроника. Статья принята к публикации после рецензирования и доработки 23.06.93г.

5. Кизеев А. А., Курванов С. А., Резник И. Т. Проектирование ИС делителя частоты СВЧ диапазона. / Республиканский научно-технический сборник. Автоматизация проектирования в электронике. - КПИ. Киев. Статья принята к публикации после рецензирования и доработки в апреле 1993г.

6. Кизеев А. А. Проектирование сверхскоростных ИС на арсениде галлия. / Республиканский научно-технический сборник " Автоматизация проектирования в электронике - КПИ. Киев. Статья

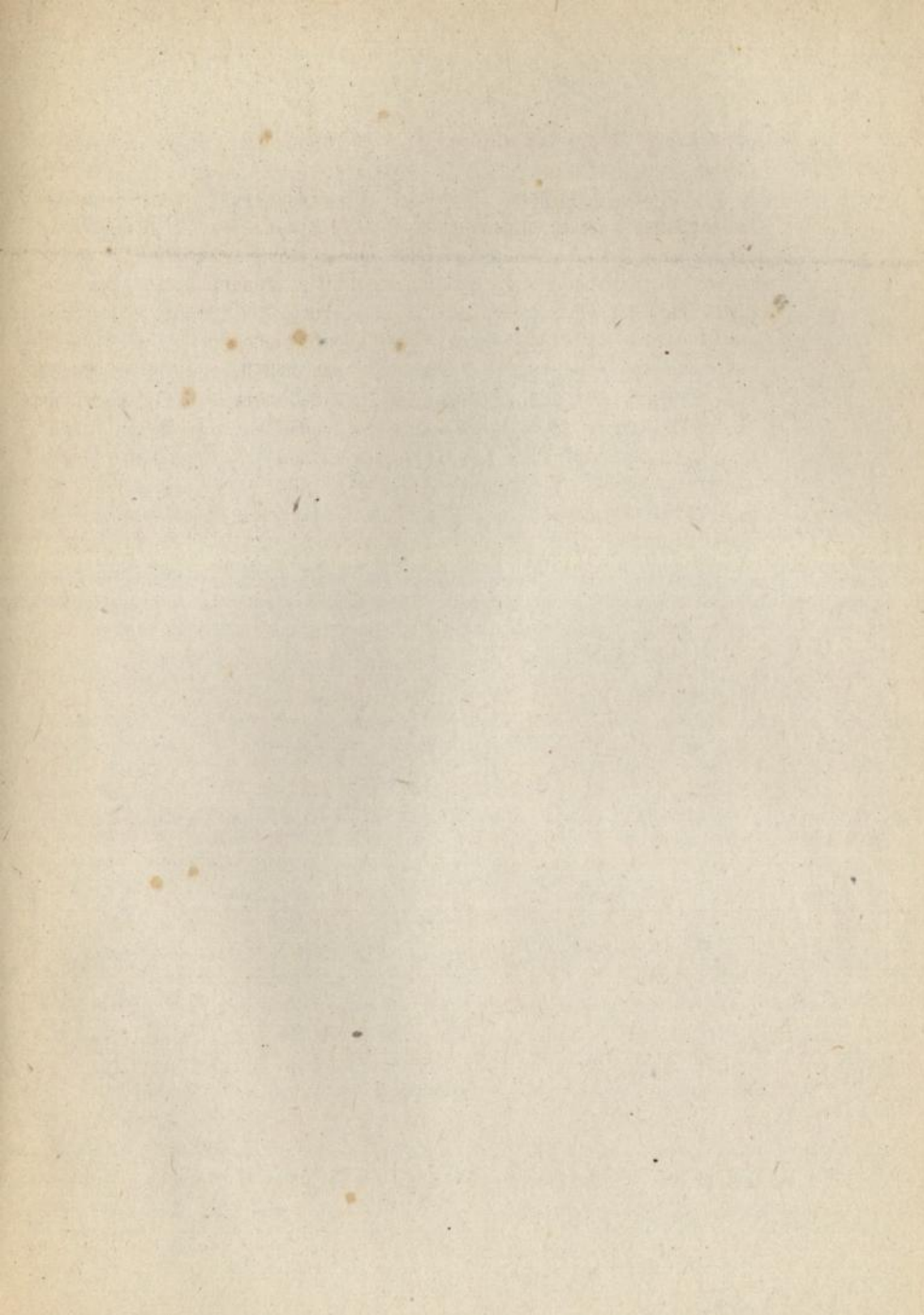
принята к публикации после рецензирования и доработки в апреле 1993г.

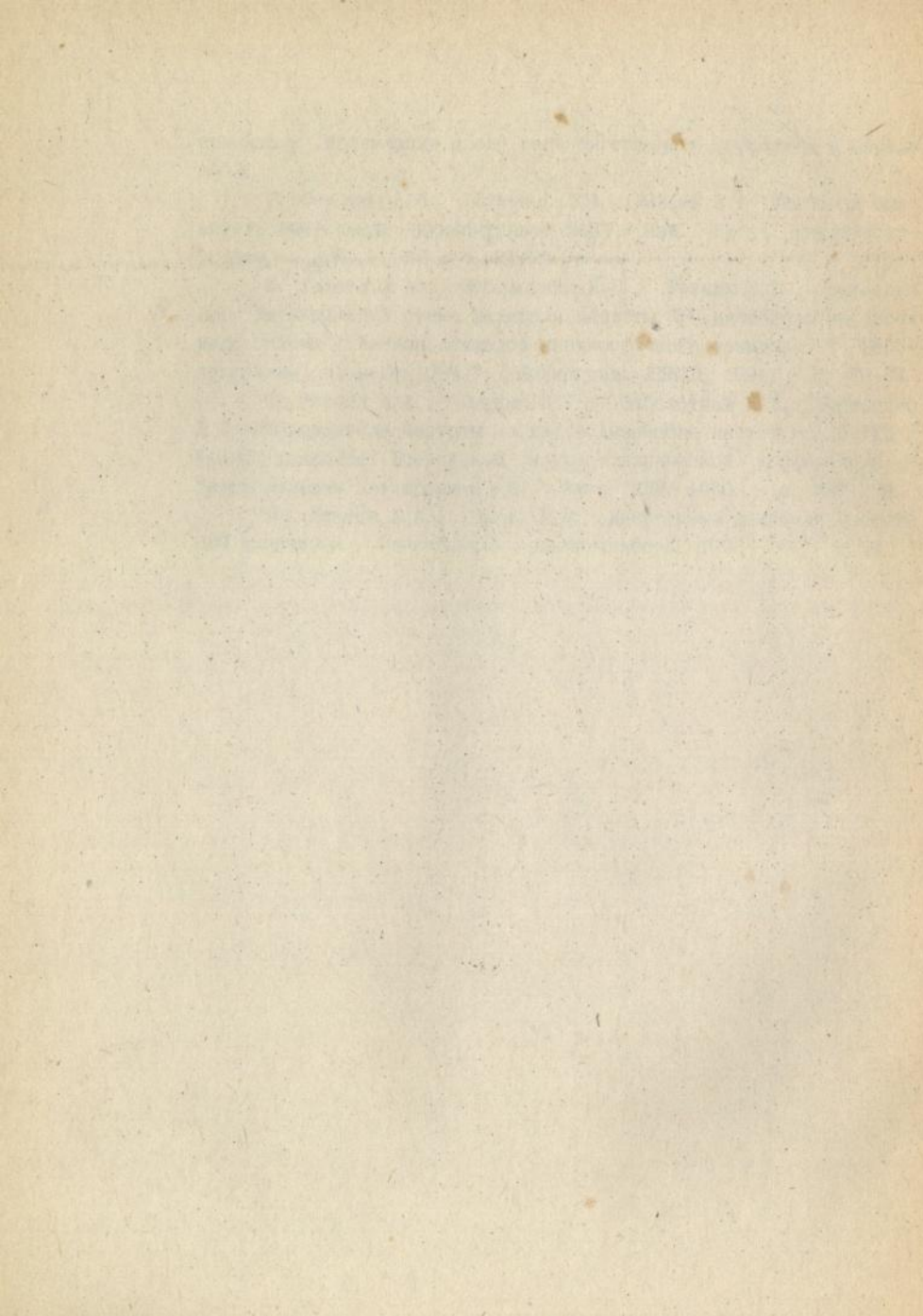
7. Семенко А. И., Симаков В. А., Кизеев А. А. Цифровой смеситель частот для двухконтурной ФАПЧ / Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1984. - №3 - с. 71-72.

8. Кизеев А. А., Заболотный Н. В., Резник И. Т., Постоенко В. Г. Интегральная схема делителя частоты СВЧ диапазона на арсениде галлия / Тезисы докладов краткосрочного семинара "Перспективные элементы СВЧ" - Ленинград: ЛДНТП, 1991. - с. 79-84.

9. Кизеев А. А., Резник И. Т., Заболотный Н. В., Постоенко В. Г. ГИС делителя частоты на два в диапазоне частот 3...8 ГГц / Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Твердотельная электроника СВЧ" Киев: КПИ, 1990. - с. 257-258.

10. Кизеев А. А., Чмиль В. М. Микросхема делителя частоты СВЧ диапазона / Электронная промышленность. 1993 - №4 - с. 58.





460653

AB 29.318