



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ
ім. О.С. ПОПОВА

Кафедра технічної електродинаміки та систем радіозв'язку

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт

«Вимірювання параметрів мікрохвильових трактів за допомогою векторного вимірювача Р4-37»

з дисципліни

«Радіовимірювальні пристрої мікрохвильового діапазону»

для студентів денної та заочної форм навчання
навчально-наукового інституту
радіо, телебачення та інформаційної безпеки

Одеса 2014

Рецензенти: д.т.н., проф. Цалієв Т.А.,
доц. ОНАЗ Бойко М.П.

Вимірювання параметрів мікрохвильових трактів за допомогою векторного вимірювача Р4-37: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Радіовимірювальні пристрої мікрохвильового діапазону” / Укл. М.Б. Проценко, М.С. Гринь. – Одеса: Вид-во ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014. – 92 с.

Метою методичних вказівок є допомога студентам при вивченні устрою та принципу дії векторного вимірювача параметрів НВЧ трактів типу Р4-37, методів їх використання для дослідження частотних характеристик і параметрів мікрохвильових пристроїв у рамках лабораторного практикуму, надання основних етапів проведення лабораторної роботи й особливостей оформлення результатів дослідження у звітному протоколі.

Методичні вказівки призначені для студентів денної та заочної форм навчання навчально-наукового інституту радіо, телебачення та інформаційної безпеки.

Методичні вказівки схвалено на засіданні кафедри технічної електродинаміки та систем радіозв'язку і рекомендовано до друку.

Протокол № 2 від 8 жовтня 2014 р.

Затверджено методичною радою академії зв'язку.

Протокол № 10/14 від 04.07 2014 р.

Підписано до друку 14.01.2015.

Обсяг 5,4 друк. арк. Формат 60х88/16 Зам. № 5.

Наклад 50 прим.

Віддруковано на видавничому устаткуванні фірми RISO
у друкарні редакційно-видавничого центру ОНАЗ ім. О.С. Попова

Україна, 65029, м. Одеса, вул. Ковалевського, 5
ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014

ЗМІСТ

1 Цикл лабораторних робіт «Вимірювання параметрів мікрохвильових трактів за допомогою векторного вимірювача Р4-37»	5
1.1 Мета робіт	5
1.2 Загальні вимоги до виконання лабораторних робіт	5
1.3 Ключові положення	5
1.4 Ключові питання для допуску до лабораторних робіт	18
1.5 Зміст звіту	19
2 Лабораторна робота «Вимірювання КСХН, модуля та аргументу коефіцієнта відбиття»	20
2.1 Домашнє завдання	20
2.2 Лабораторне завдання	21
2.3 Питання до захисту лабораторної роботи	21
3 Лабораторна робота «Вимірювання модуля та аргументу коефіцієнта передачі»	22
3.1 Домашнє завдання	22
3.2 Лабораторне завдання	23
3.3 Питання до захисту лабораторної роботи	23
4 Лабораторна робота «Вимірювання повних опорів»	24
4.1 Домашнє завдання	24
4.2 Лабораторне завдання	25
4.3 Питання до захисту лабораторної роботи	25
5 Лабораторна робота «Вимірювання ГЧЗ відбитої хвилі»	27
5.1 Домашнє завдання	27
5.2 Лабораторне завдання	28
5.3 Питання до захисту лабораторної роботи	28
6 Лабораторна робота «Вимірювання ГЧЗ чотириполосників»	30
6.1 Домашнє завдання	30
6.2 Лабораторне завдання	31
6.3 Питання до захисту лабораторної роботи	32
Рекомендована література	33
Додаток А. Інструкція з експлуатації векторного вимірювача Р4-37	34
А.1 Підготовка до проведення вимірювань вхідних параметрів	34
А.2 Підготовка до проведення вимірювань прохідних параметрів	37
А.3 Вимірювання вхідних параметрів	40
А.3.1 Вимірювання КСХН та аргументу коефіцієнта відбиття	40
А.3.2 Вимірювання модуля та аргументу коефіцієнта відбиття	40
А.3.3 Вимірювання повних опорів	41
А.3.4 Вимірювання ГЧЗ відбитої хвилі	41
А.4 Вимірювання прохідних параметрів	42
А.4.1 Вимірювання послаблення від +10 до -40 дБ та аргументу коефіцієнта передачі	42

А.4.2 Вимірювання послаблення понад -40 дБ	43
А.4.3 Вимірювання підсилення до 30 дБ	43
А.4.4 Вимірювання ГЧЗ чотириполюсників	43
Додаток Б. Діаграма Вольперта-Сміта (кругова діаграма повних опорів)	45
Додаток В. Титульний лист установленого зразка	47

1 ЦИКЛ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

«Вимірювання параметрів мікрохвильових трактів за допомогою векторного вимірювача Р4-37»

1.1 Мета робіт

Метою лабораторних робіт є знайомство з устроєм і принципом дії векторного вимірювача Р4-37, вивчення методів його використання для дослідження частотних характеристик мікрохвильових трактів.

1.2 Загальні вимоги до виконання лабораторних робіт

Зміст виконуваних лабораторних робіт повинен бути попередньо вивчений із залученням теоретичного матеріалу з лекційного курсу та відповідної літератури.

Лабораторні роботи виконуються бригадами у складі 2 – 4-х студентів, кожен з яких виконує своє індивідуальне завдання.

Звіт складається кожним студентом і захищається в індивідуальному порядку.

Вихідні дані для виконання завдань досліджень вибираються кожним студентом індивідуально відповідно до передостанньої m та останньої n цифрами номера залікової книжки згідно з вихідними даними.

1.3 Ключові положення

Призначення вимірювача Р4-37

Вимірювачі комплексних коефіцієнтів передачі Р4-37 (вимірювальний тракт 50 Ом, канал 7/3,04 мм), Р4-37/1 (вимірювальні тракти 50 Ом, канали 16/6,95 и 7/3,04 мм; 75 Ом канал 16/4,6 мм) (див. рис. 1.1) призначені для панорамного вимірювання частотних залежностей S -параметрів коаксіальних багатополіусників (послаблення, модуля коефіцієнта відбиття, КСХН, аргументів коефіцієнтів відбиття та передачі) у діапазоні частот від 1 до 1250 МГц з цифровим відліком вимірюваних величин та відтворенням їх частотних залежностей на екрані електронно-променевої трубки (ЕПТ) у декартовій та полярній системах координат.

Вимірювачі Р4-37, Р4-37/1 також дозволяють вимірювати активну R та реактивну X складові повного нормованого вхідного опору $Z = R + iX$ та груповий час затримки (ГЧЗ), обчислюваних за відомими алгоритмами за результатами вимірювання S -параметрів.

Вимірювач комплексних коефіцієнтів передачі Р4-37 забезпечує додаткові метрологічні можливості, такі як:

— вилучення похибок калібрування з результатів вимірювання;



Рисунок 1.1 — Зовнішній вигляд векторного вимірювача Р4-37

- одночасний цифровий відлік смуги частот, частоти вимірювання та вимірюваної величини на цій частоті;
- запам'ятовування досліджуваної характеристики та проведення вимірювань відносно неї;
- вимірювання ГЧЗ та місця несправності у лінії передачі;
- діалоговий режим роботи з вимірювачами дозволяє проводити виявлення помилок та невірних дій оператора при вимірюваннях.

Склад вимірювача Р4-37

Конструктивно вимірювач комплексних коефіцієнтів передачі Р4-37 виконаний у настільному варіанті. До складу приладу входять такі основні блоки та вузли:

- блок вимірювальний;
- генератор хитної частоти (ГХЧ4);
- перетворювач частоти;
- вимірювальні НВЧ вузли.

Із вузлів та блоків збираються необхідні схеми вимірювань.

Устрій та принцип дії вимірювача Р4-37

Принцип дії вимірювача Р4-37 оснований на направленому відгалуженні падаючої на вимірювальний пристрій та відбитої хвиль надвисокочастотного (НВЧ) сигналу, які поширюються у вимірювальному тракті вимірювача, селективному перетворенні їх в опорний $U_{\text{н}}$ та вимірюваний $U_{\text{â}}$ сигнали проміжної частоти за допомогою слідкуючого гетеродина та формування трьох напруг, пропорційних $U_{\text{н}}$, $U_{\text{â}} \cos \varphi$ і $U_{\text{â}} \sin \varphi$.

На рис. 1.2 зображена спрощена структурна схема векторного вимірювача Р4-37. Вимірювачі складаються з трьох блоків: блока вимірювального, ГХЧ4 та перетворювача частоти.

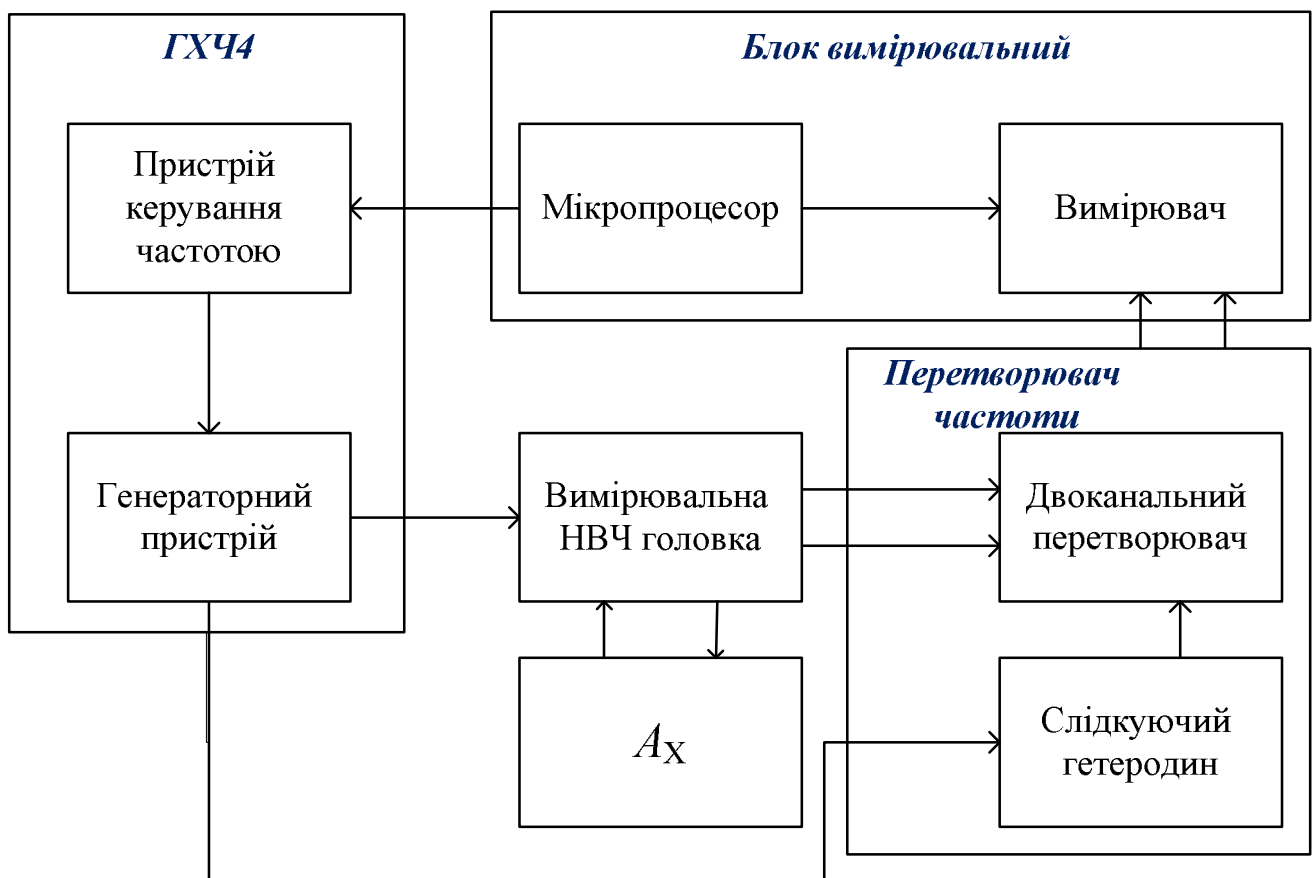


Рисунок 1.2 — Спрощена структурна схема вимірювача Р4-37

ГХЧ4 являє собою програмно-кероване джерело НВЧ-сигналу. Він складається з безпосереднього джерела НВЧ-сигналу (генераторного пристрою) та схеми керування, стабілізації та вимірювання частоти (пристрою керування частотою).

Команди керування частотою у цифровій формі надходять з мікропроцесора блока вимірювального.

Вихідний сигнал ГХЧ4 надходить на вимірювальну НВЧ-головку, виділяючи інформацію про вимірюваний параметр у вигляді двох сигналів, які надходять на входи перетворювача частоти. Постійність проміжної частоти вихідних сигналів перетворювача частоти забезпечується автоматичним слідкуванням частоти гетеродина за частотою вимірювального сигналу за допомогою системи фазового автопідстроювання.

Перетворювач частоти та виносні змішувачі служать для переносу інформації про вимірювану величину з НВЧ вимірювального сигналу на проміжну частоту 100 кГц.

Проміжна частота 100 кГц надходить на блок вимірювальний, який служить для посилення сигналів частотою 100 кГц, їх детектування, перетворення в цифрову форму, а також цифрового оброблення та виведення на екран ЕПТ інформації у вигляді частотних характеристик та цифро-знакових символів.

Принцип дії блока вимірювального оснований на програмній реалізації усіх керуючих та обчислювальних операцій, сукупність яких забезпечує отримання та подання у графічній (на екрані ЕПТ) та цифровій формах інформації про різницю фаз та відношення амплітуд вхідних сигналів, а також похідних величин, отримуваних функціональним перетворенням.

Блок вимірювальний здійснює керування роботою усього вимірювача та виконує такі основні операції:

- установку заданої смуги перестроювання частот, лінійне перестроювання частоти у заданій смузі, цифровий відлік смуги та частоти позначки;
- калібрування вимірювача за амплітудою та аргументом у встановленій смузі частот, запам'ятовування та вилучення нерівномірностей калібрування;
- обчислення та індикацію вимірюваного параметра на екрані ЕПТ у цифровій формі та у вигляді кривих частотних залежностей;
- вилучення похибки неузгодженості при вимірюванні вхідних параметрів.

Робота блока вимірювального основана на покроковому керуванні частотою ГХЧ4 кодовими числами, отримані на кожному кроці відгуку НВЧ вимірювальної схеми, оцінці рівнів сигналів відгуку, їх нормуванні в перетворювачі аналого-вимірювальному та передачі через аналого-цифровий перетворювач в обчислювальний пристрій для оброблення. Оброблена інформація у вигляді частотної залежності потрібного параметра виводиться на екран ЕПТ з частотою перестроювання 50 Гц (при перестроюванні ГХЧ4 з частотою близько 3 Гц), тобто вимірювач працює у псевдореальному масштабі часу. Інформація виводиться в 512 частотних точках встановленої смуги перестроювання. Всі взаємодії між генераторною, приймальнооброблюючою та індикаційною частинами вимірювача здійснюються через вузол керування за програмою, записаною у постійному запам'ятовувальному пристрої. Органи керування дискретної дії передньої панелі блока вимірювального об'єднані єдиною магістраллю, яка є спрощеним варіантом лінії колективного користування.

Режими роботи вимірювача Р4-37

У залежності від схеми з'єднання НВЧ вимірювальних вузлів можливі наступні режими вимірювань:

- **вимірювання вхідних параметрів** (модуля та аргументу коефіцієнта відбиття, КСХН, складових R та X повного опору $Z = R + iX$);
- **вимірювання прохідних параметрів** (модуля та аргументу коефіцієнта передачі, послаблення та ГЧЗ);
- **вимірювання підсилення** до 30 дБ.

Вимірювання та спостереження частотних залежностей параметрів можна проводити у межах усієї смуги частоти вимірювача (1 – 1250 МГц) або в установленій смузі, але похибки вимірювання гарантуються лише при вимірюваннях у смузі частот не більше 650 МГц.

При вимірюванні фазових характеристик бажано вибирати таку смугу частот, щоб вимірюваний набіг фази у встановленій смузі не перевищував 2π , особливо це стосується вимірювань у полярній системі координат.

Калібрування вимірювача необхідно проводити у декартовій системі координат. Вимірювання можна проводити як у декартовій, так і в полярній системах координат. Переходити до полярної системи рекомендується у випадках необхідності (наприклад, при вимірюванні та спостереженні повних опорів з використанням кругових діаграм Вольперта-Сміта).

При проведенні тривалих вимірювань, особливо у широкій смузі частот, перекалібрування вимірювача потрібно проводити не більш ніж через 15 хв.

Призначення основних органів керування вимірювача Р4-37

Принцип дії вимірювача Р4-37 оснований на програмній реалізації усіх керуючих та обчислювальних операцій, сукупність яких забезпечує отримання та подання у графічному та цифровому вигляді на екрані ЕПТ інформації про частотні залежності вимірюваних параметрів. Керування режимами роботи та виглядом інформації, що подається, здійснюється з передньої панелі вимірювача за допомогою кнопочових перемикачів.

Для вилучення помилок у діях оператора у вимірювачі введений діалоговий режим.

Процес підготовки вимірювача до вимірювань та проведення вимірювань автоматизований шляхом програмної реалізації наступних алгоритмів:

- підготовка та калібрування вимірювача за частотою;
- калібрування вимірювача за амплітудою та фазою;
- вимірювання окремих параметрів та виведення інформації на екран ЕПТ.

Після увімкнення тумблера «**СЕТЬ**» на блоках вимірювач Р4-37 вважається підготовленим до роботи через 15 хв. підігріву.

При натисканні кнопки « $\Delta F_{\max}$ » вмикається програма лінеаризації та калібрування частотного діапазону в межах усієї робочої смуги частот вимірювача Р4-37.

При натисканні кнопки «F1» цифровими кнопками «0», «1», «2»...«9» набирається нижня частота потрібної смуги перестроювання, аналогічно при натисканні кнопки «F2» — верхня частота. Частоти F1 та F2 індикуються у нижній частині екрана ЕПТ. Програмою передбачено, щоб значення набраних частот F1 та F2 не виходили за межі робочих частот вимірювача, а калібрувальні константи запам'ятовуються в 512 точках встановленої смуги перестроювання.

Ручка «МЕТКА» призначена для пересування позначки за кривими частотних залежностей параметрів на екрані ЕПТ. Значення частоти та величина вимірюваного параметра на позначеній частоті індикуються у цифровій формі у верхній частоті екрана ЕПТ.

Установлення позначки на потрібну частоту з похибкою через дискретність перестроювання частоти можна проводити також програмним шляхом. Для цього необхідно натиснути кнопку «F». У нижній частині екрана ЕПТ з'явиться знак «?». За допомогою цифрових кнопок вибрати потрібні значення частоти. Натиснути кнопку «».

За натиснутої кнопки «F» частотна позначка не буде керуватись ручкою «МЕТКА». Для переходу на іншу частоту вимірювання необхідно повернути до вихідного положення кнопку «F», потім повторно натиснути та повторити цифровий набір нової частоти. Натиснути кнопку «».

Кнопки «0», «1», «2»...«9» служать не тільки для вибору потрібної частоти F1 або F2, але й керують цифровим фазообертачем, який вимірює фазовий зсув між опорним та вимірюваним сигналами та забезпечують інші необхідні цифрові керування.

При натисканні кнопок «», «», «», «» буде зсуватись або змінюватись нахил фазо-частотної характеристики в залежності від набраних значень на цифрових кнопках. Вимірювання нахилу фазочастотної характеристики еквівалентне вимірюванню електричної довжини опорного каналу вимірювача.

Кнопка «» одночасно служить для зміни масштабу за фазою на екрані ЕПТ у декартовій системі координат в 2, 4, 8 разів (збільшується чутливість за фазою). При натисканні кнопки один раз збільшується у 2 рази; 2 — у 4, 3 — у 8 разів. При наступному натисканні чутливість зменшується. Якщо при наборі цифрових значень відбулась помилка, то необхідно натиснути кнопку «», яка забезпечить стирання. Кнопка «» також забезпечує повернення програми калібрування вимірювача у вихідне положення. При натисканні кнопок «K1», «K2» та цифрових кнопок можна встановлювати контрольні рівні для визначення допустимості зміни досліджуваного параметра.

При натисканні кнопки «» здійснюється запис числової величини, набраної за допомогою цифрових кнопок. За допомогою кнопки «», яку необхідно утримувати натисненою 2 – 3 с, запускаються програми калібрування за модулем та фазою відносно відповідного калібрувального еталона (холостого ходу — модуль 1 та фаза 0° або короткого замикання — модуль 1 та фаза 180°). При вимірюванні коефіцієнтів відбиття (натиснута кнопка «») калібрування проводиться за холостим ходом (ХХ) та коротким замиканням (КЗ), що

забезпечить зменшення похибки при вимірюванні. Наступне натискання кнопок «▼» та «» повертає програму калібрування вимірювача у вихідне положення.

При порушенні процесу калібрування за будь-якої причини, появи на екрані запису «ОШИБКА» необхідно натиснути ОБЩ «», а потім повторити процес встановлення смуги перестроювання частоти, встановлення рівня опорного сигналу, вирівнювання набігання за фазою та калібрування.

Вирівнювання ліній калібрування за фазою та модулем при вимірюванні прохідних параметрів або завершення процесу усереднення при вимірюванні параметрів відбиття (погасне запис — КЗ «?») означає, що калібрування вимірювача завершено і можна починати вимірювання.

При всіх вимірюваннях необхідно враховувати, що перемикавання атенюатора в опорному каналі можливе при натиснутих кнопках «» та ОН (ПРЕДЕЛЫ «dB»), також передбачене автоматичне вимкнення атенюатора при вимірюванні послаблень понад -60 дБ в автоматичному режимі, а переключення атенюаторів у вимірювальному каналі можна проводити як у ручному режимі при натиснутих кнопках ИН (ПРЕДЕЛЫ «dB»), так і в автоматичному (кнопка «» знаходиться у вихідному положенні — не натиснута). В цьому випадку перемикавання атенюаторів буде здійснюватись програмним шляхом. Через те, що багато кнопок мають багатоцільове призначення, тому необхідно пам'ятати про сувору послідовність при натисканні кнопок.

Після натискання кнопок «», «», операцій з цифровими кнопками «0», «1», «2»...«9» необхідне натиснення кнопки «». При зміні нахилу фазової характеристики або зміщенні кривої у межах екрана ЕПТ ступенями необхідно набрати необхідне числове значення, натиснути кнопки «», «0», потім повторно натиснути «», «0» і т.д. Переміщення буде здійснюватись із заданим кроком.

Кнопки («R», «X», «|Γ|», КСВН, « $\hat{O}$ », «A_X», ГВЗ) комутують програми обчислень та виведення на екран ЕПТ значень позначених параметрів. Вихідними при обчисленні є модуль |Γ| та аргумент φ вимірюваного коефіцієнта відбиття (або передачі).

Інші параметри обчислюються у відповідності з наступними виразами:

— активна R та реактивна X складові повного нормованого опору

$$Z = R + iX$$

$$Z = R + iX = \frac{1 + |\Gamma| \exp(i\varphi)}{1 - |\Gamma| \exp(i\varphi)}; \quad (1.1)$$

— КСХН

$$K_{\text{сò.у}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}; \quad (1.2)$$

— послаблення A , дБ

$$A = 20 \lg(|\Gamma|); \quad (1.3)$$

— ГЧЗ

$$\tau_0 = \frac{d\varphi}{d\omega} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(f)}{df}, \quad (1.4)$$

де $\varphi(f)$ — вимірювана частотна залежність аргументу коефіцієнта відбиття (передачі).

При натисненні зазначених кнопок (за винятком кнопки **ГВЗ**) на екрані ЕПТ будуть індикуватись криві модуля $|\Gamma|$ та аргументу φ коефіцієнта відбиття (передачі), а при натисненні кнопки **ГВЗ** — модуля $|\Gamma|$ та ГЧЗ. Значення параметрів (R , X , КСХН, A , $|\Gamma|$, φ , ГЧЗ) на частоті позначки індикуються у цифровій формі у верхній частині екрана ЕПТ.

Для зручності вимірювання окремих параметрів передбачені наступні режими індикації вимірюваних величин:

— лінійний масштаб за модулем та фазою у декартових координатах (кнопка «□» у вихідному положенні);

— логарифмічний масштаб за амплітудою для спостереження амплітудно-частотних залежностей з великим перепадом з послаблення (кнопка «□» у вихідному положенні та натиснута кнопка «lg»);

— лінійний масштаб за амплітудою та фазою у полярних координатах $|\Gamma|$ та φ для спостереження частотних залежностей R та X на круговій діаграмі повних опорів, які є у комплекті вимірювача (натиснута кнопка «○», кнопка «lg» у вихідному положенні).

Зміна режимів індикації не потребує перекалібрування вимірювача.

Під обрамленням ЕПТ знаходяться резистори регулювання яскравості «*», фокуса «⊙ 1», «⊙ 2», зміщення по вертикалі «↓» та горизонталі «↔», за допомогою яких перед вимірюваннями можна встановити зручні для спостереження яскравість та фокус променя.

Якщо потрібно виміряти неідентичність двох пристроїв, то необхідно провести калібрування вимірювача у режимі вимірювання вхідних або прохідних параметрів в залежності від об'єкта вимірювання, потім підключити еталонний пристрій та одночасно індикувати криві модуля та аргументу (кнопки «Φ» та «|S|» (КАНАЛЫ) натиснуті). Для цього необхідно натиснути кнопки «П» та «Х-П» або «Х/П» у залежності від того, яку криву (аргументу або модуля) необхідно запам'ятати. На екрані ЕПТ повинна залишитись крива аргументу або модуля еталонного пристрою. Далі відключіть еталонний пристрій та підключіть вимірюваний об'єкт. На екрані ЕПТ будуть індикуватись криві еталонного та вимірюваного пристроїв. Після цього натисніть кнопку «Φ» (ВИД ИЗМЕР.) за натиснутої кнопки «Х-П» та, переміщуючи частотну позначку, визначіть різницю фаз між вимірюваним та еталонним пристроями. Аналогічно, за натиснутої

кнопці «Х/П» натисніть кнопку «А_х» та виконайте порівняння амплітудних характеристик у децибелах.

Технічні параметри вимірювача Р4-37

1) Робочі умови експлуатації:

- температура оточуючого повітря від 5 до 40°C;
- відносна вологість повітря не більше 80% при температурі 25°C;
- напруга живлячої мережі 220 ± 22 В, з частотою $50 \pm 0,4$ Гц.

Примітка. Не допускається піддавати вимірювачі впливу циклічних змін температур.

2) Робочий діапазон частот вимірювача від 1 до 1250 МГц. Допускається одна «уражена» точка на частоті (1090 ± 3) МГц.

3) Межі допустимого значення основної абсолютної похибки вимірювання частоти вимірювача Δf у смузі частот не більш ніж 650 МГц на частотах $f < 31$ МГц складають ± 20 кГц, а при $f > 31$ МГц встановлюється згідно зі значеннями, визначених в МГц за формулою:

$$\Delta f = \pm(0,1 + 0,001 f),$$

де f — значення вимірюваної частоти, МГц.

4) Нерівномірність рівня калібрування у режимі вимірювання КСХН та аргументу коефіцієнта відбиття у смузі частот не більш ніж 650 МГц складає:

- не більш ніж 0,5 дБ за амплітудою;
- не більш ніж 5° за фазою.

5) Діапазони:

- індикації КСХН від 1 до ∞ ;
- вимірювання КСХН від 1,03 до 2,0;
- вимірювання модуля коефіцієнта відбиття від 0,02 до 1;
- вимірювання аргументу коефіцієнта відбиття від 0 до $\pm 180^\circ \cdot n$ при КСХН входу від 1,2 до 2,0, де n — число цілих перепадів набігу фази у вимірюваній смузі, $n \leq 10$.

Примітка. Замість знака « ∞ » на екрані ЕПТ може висвічуватись будь-яке тризначне число C , $|C| \geq 100$.

6) Межі допустимого значення основної відносної похибки вимірювання КСХН $\delta K_{C0.U}$ та модуля коефіцієнта відбиття $\delta \Gamma_x$ при калібруванні у смузі частот не більш ніж 650 МГц встановлюються згідно зі значеннями, які визначаються у відсотках за формулами:

$$\delta K_{C0.U} = \pm 2,4 K_{C0.U} \text{ при } 1,03 \leq K_{C0.U} \leq 2,0;$$

$$\delta\Gamma_x = \pm(1 + 5|\Gamma_x| + 1,2/|\Gamma_x|) \text{ при } 0,02 \leq |\Gamma_x| \leq 1,0,$$

де $K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}}$ — значення вимірюваного КСХН; $|\Gamma_x|$ — значення вимірюваного коефіцієнта відбиття.

7) Межі допустимого значення відносно значення відносної похибки вимірювання КСХН $\delta K'_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}}$ та модуля коефіцієнта відбиття $\delta\Gamma'_x$ при калібруванні у смузі частот не більш ніж 650 МГц під дією впливаючих факторів встановлюються згідно зі значеннями, визначених у відсотках за формулами:

$$\delta K'_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}} = \pm(2,4K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}} + 2) \text{ при } 1,03 \leq K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}} \leq 2,0;$$

$$\delta\Gamma'_x = \pm(4 + 5|\Gamma_x| + 1,2/|\Gamma_x|) \text{ при } 0,02 \leq |\Gamma_x| \leq 1,0,$$

де $K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}}$ — значення вимірюваного КСХН; $|\Gamma_x|$ — значення вимірюваного коефіцієнта відбиття.

8) Межі допустимого значення основної абсолютної похибки вимірювання аргументу коефіцієнта відбиття $\Delta\phi\Gamma_x$ при калібруванні у смузі частот не більш ніж 650 МГц встановлюються згідно зі значеннями, які визначаються в градусах за формулами:

$$\Delta\phi\Gamma_x = \pm(3 + 4/K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}}) \text{ при } 1,2 \leq K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}} \leq 2,0;$$

$$\Delta\phi\Gamma_x = \pm(1,5 + |\Gamma_x| + 0,5/|\Gamma_x|) \text{ при } 0,05 \leq |\Gamma_x| \leq 1,0,$$

де $K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}}$ — значення вимірюваного КСХН; $|\Gamma_x|$ — значення вимірюваного коефіцієнта відбиття.

9) Межі допустимого значення абсолютної похибки вимірювання аргументу коефіцієнта відбиття $\Delta\phi\Gamma'_x$ при калібруванні у смузі частот не більш ніж 650 МГц при дії впливаючих факторів встановлюються згідно зі значеннями, визначених у градусах за формулами:

$$\Delta\phi\Gamma'_x = \pm(5 + 4/K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}}) \text{ при } 1,2 \leq K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}} \leq 2,0;$$

$$\Delta\phi\Gamma'_x = \pm(4,5 + |\Gamma_x| + 0,5/|\Gamma_x|) \text{ при } 0,05 \leq |\Gamma_x| \leq 1,0,$$

де $K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}}$ — значення вимірюваного КСХН; $|\Gamma_x|$ — значення вимірюваного коефіцієнту відбиття.

10) Діапазон вимірювання модуля коефіцієнта передачі при калібруванні у смузі частот не більш ніж 650 МГц

від +35 до – 80 дБ.

11) Діапазон вимірювань аргументу коефіцієнта передачі у декартовій системі координат при коефіцієнті передачі від $+35$ до -60 дБ

від 0 до $\pm 180^\circ \cdot n$,

де n — число цілих перепадів набіг фази у вимірюваній смузі, $n \leq 10$.

12) Межі допустимого значення основної абсолютної похибки вимірювання модуля коефіцієнта передачі ΔA_x при калібруванні у смузі частот не більш ніж 650 МГц встановлюються згідно зі значеннями, визначених у децибелах за формулою

$$\Delta A_x = \pm(0,01|A_x| + 0,3),$$

де A_x — значення вимірюваного модуля коефіцієнта передачі при КСХН входу та виходу пристроїв не більш ніж $1,3$ дБ.

13) Межі допустимого значення абсолютної похибки вимірювання модуля коефіцієнта передачі $\Delta A'_x$ при калібруванні у смузі частот не більш ніж 650 МГц при дії впливаючих факторів встановлюються згідно зі значеннями, визначених у децибелах за формулою

$$\Delta A_x = \pm(0,015|A_x| + 0,4),$$

де A_x — значення вимірюваного модуля коефіцієнту передачі при КСХН входу та виходу пристроїв не більш ніж $1,3$ дБ.

14) Межі допустимого значення додаткової абсолютної похибки вимірювання модуля коефіцієнта передачі ΔA при КСХН входу та виходу пристроїв більш ніж $1,3$ встановлюються згідно зі значеннями, які визначаються в децибелах за формулою

$$\Delta A = \pm 10 \sqrt{|S_{11}\Gamma_1|^2 + |S_{22}\Gamma_2|^2 + |\Gamma_1\Gamma_2|^2 |S_{11}S_{22}|^2},$$

де Γ_1 та Γ_2 — коефіцієнти відбиття виходу трійника та входу атенюатора 6 дБ, навантаженого на змішувач вимірювального каналу, які не перевищують величин $|\Gamma_1| \leq 0,1$ та $|\Gamma_2| \leq 0,1$; S_{11} , S_{22} — елементи матриці розсіювання вимірюваного пристрою.

15) Межі допустимого значення основної абсолютної похибки вимірювання аргументу коефіцієнта передачі $\Delta \varphi A_x$ при калібруванні у смузі частот не більш ніж 650 МГц (при вимірюванні A_x від $+30$ до -60 дБ) встановлюються згідно зі значеннями, визначених у градусах за формулою

$$\Delta \varphi A_x = \pm(2 + 0,05|A_x|),$$

де A_x — значення вимірюваного модуля коефіцієнта передачі при КСХН входу та виходу пристроїв не більш ніж 1,3 дБ.

16) Межі допустимого значення абсолютної похибки вимірювання аргументу коефіцієнта передачі $\Delta\varphi A'_x$ при калібруванні у смузі частот не більш ніж 650 МГц при дії впливаючих факторів встановлюються згідно зі значеннями, визначених в градусах за формулою

$$\Delta\varphi A'_x = \pm(3 + 0,05|A_x|),$$

де A_x — значення вимірюваного модуля коефіцієнта передачі при КСХН входу та виходу пристроїв не більш ніж 1,3 дБ.

17) Межі допустимого значення додаткової абсолютної похибки вимірювання аргументу коефіцієнта передачі $\Delta\varphi$ при КСХН входу та виходу пристроїв більш ніж 1,3 встановлюються згідно зі значеннями, визначених у градусах за формулою

$$\Delta\varphi = \pm 100 \sqrt{|S_{11}\Gamma_1|^2 + |S_{22}\Gamma_2|^2 + |\Gamma_1\Gamma_2|^2 |S_{11}S_{22}|^2},$$

де Γ_1 та Γ_2 — коефіцієнти відбиття виходу трійника та входу атенюатора 6 дБ, навантаженого на змішувач вимірювального каналу, не перевищуючі величини $|\Gamma_1| \leq 0,1$ и $|\Gamma_2| \leq 0,1$; S_{11} , S_{22} — елементи матриці розсіювання вимірюваного пристрою.

18) Діапазон вимірювання групового часу затримки (ГЧЗ)

$$- \text{від } 0 \text{ до } 10^4/F \text{ нс,}$$

де F , МГц — смуга частот, в якій відбувається індикація ГЧЗ на екрані ЕПТ;

$$F \geq 10 \text{ МГц} \quad \text{при } f_a \leq 31 \text{ МГц} \text{ та } F \geq 50 \text{ МГц} \quad \text{при } f_a \geq 31 \text{ МГц.}$$

19) Межі допустимого значення основної абсолютної похибки вимірювання ГЧЗ $\Delta\tau$ в смузі частот від $0,02F$ до $0,96F$ при вимірюванні A_x від 0 до -60 дБ встановлюються згідно зі значеннями, визначених в наносекундах за формулою

$$\Delta\tau = \pm(0,03|A_x| + 300/F),$$

де A_x , дБ — значення вимірюваного модуля коефіцієнта передачі при КСХН входу та виходу пристроїв не більш ніж 1,3; F , МГц — смуга частот, в якій відбувається індикація ГЧЗ на екрані ЕПТ.

20) Межі допустимого значення абсолютної похибки вимірювання ГЧЗ $\Delta\tau'$ при вимірюванні від 0 до -60 дБ при дії впливаючих факторів встановлюються згідно зі значеннями, визначених в наносекундах за формулою

$$\Delta\tau = \pm(0,03|A_x| + 400/F),$$

де A_x , дБ — значення вимірюваного модуля коефіцієнта передачі при КСХН входу та виходу пристроїв не більш ніж 1,3; F , МГц — смуга частот, в якій відбувається індикація ГЧЗ на екрані ЕПТ.

21) Вимірювач забезпечує свої технічні характеристики у межах норм, встановлених технічними умовами, по закінченні часу встановлення робочого режиму, який дорівнює

– 15 хв.

22) Нестабільність рівня калібрування вимірювача після 15 хвилинного прогріву за 15 хв у нормальних умовах

- не більш ніж $\pm 0,2$ дБ за модулем;
- не більш ніж $\pm 1^\circ$ за фазою.

23) Рівень потужності на вході вимірюваного пристрою в усіх режимах вимірювання за винятком вимірювання послаблення від -40 до -80 дБ

– не більш ніж 10^{-6} Вт.

24) Потужність, яку споживає вимірювач від мережі при номінальній напрузі

– не перевищує 480 ВА.

25) Хвильовий опір вимірювального тракту 50 Ом та 75 Ом (з'єднувачі — тип III, варіант 1; тип II та тип VIII за ГОСТ 13317-80 відповідно).

26) Вимірювач допускає неперервну роботу в робочих умовах з перебігом часу не менш ніж 8 год. при збереженні своїх технічних характеристик у межах норм.

27) Напрацювання на відмову не менш ніж 3000 год.

28) Габаритні розміри та маса:

- ГХЧ4: не більш ніж 488 x 495 x 93 мм, 17 кг;
- блок вимірювальний: не більш ніж 488 x 536 x 253 мм, 28 кг;
- перетворювач частоти: 488 x 495 x 93, 12 кг;
- комплекти комбіновані: 483 x 375 x 170, 14 и 15 кг.

1.4 Ключові питання для допуску до лабораторних робіт

1) Сформулюйте призначення векторного вимірювача Р4-37. Поясніть вимірювані параметри.

2) Назвіть блоки векторного вимірювача Р4-37. Поясніть їх призначення.

3) Назвіть та поясніть режими роботи векторного вимірювача Р4-37.

4) Сформулюйте робочі умови експлуатації векторного вимірювача Р4-37.

5) Який робочий діапазон векторного вимірювача Р4-37 та яка похибка визначення частоти, від чого вона залежить?

6) Назвіть та поясніть діапазони індикації та вимірювання КСХН, модуля та аргументу коефіцієнта відбиття.

7) Яка похибка вимірювання КСХН у робочих умовах експлуатації векторного вимірювача Р4-37 без впливу та під дією впливаючих факторів, від чого вона залежить? Поясніть причини їх відмінностей.

8) Яка похибка вимірювання модуля коефіцієнта відбиття в робочих умовах експлуатації векторного вимірювача Р4-37 без впливу та під дією впливаючих факторів, від чого вона залежить? Поясніть причини їх відмінностей.

9) Яка похибка вимірювання аргументу коефіцієнта відбиття в робочих умовах експлуатації векторного вимірювача Р4-37 без впливу та під дією впливаючих факторів, від чого вона залежить? Поясніть причини їх відмінностей.

10) Назвіть та поясніть діапазони вимірювання модуля коефіцієнта передачі (послаблення) та аргументу коефіцієнта передачі.

11) Яка похибка вимірювання модуля коефіцієнта передачі в робочих умовах експлуатації векторного вимірювача Р4-37 без впливу та під дією впливаючих факторів, від чого вона залежить? Поясніть причини їх відмінностей.

12) Як визначається додаткова похибка вимірювання модуля коефіцієнта передачі при КСХН входу та виходу вимірюваного пристрою більш ніж 1,3, від чого вона залежить?

13) Яка похибка вимірювання аргументу коефіцієнта передачі в робочих умовах експлуатації векторного вимірювача Р4-37 без впливу та при дії впливаючих факторів, від чого вона залежить? Поясніть причини їх відмінностей.

14) Як визначається додаткова похибка вимірювання аргументу коефіцієнта передачі при КСХН входу та виходу вимірюваного пристрою більш ніж 1,3, від чого вона залежить?

15) Назвіть та поясніть діапазон вимірювання групового часу затримки.

16) Яка похибка вимірювання групового часу затримки у робочих умовах експлуатації векторного вимірювача Р4-37 без впливу та під дією впливаючих факторів, від чого вона залежить? Поясніть причини їх відмінностей.

17) Назвіть значення хвильового опору мікрохвильового тракту векторного вимірювача Р4-37.

1.5 Зміст звіту

Звіт по лабораторній роботі повинен мати:

- 1) Титульний лист установленого зразка (див. Додаток В) .
- 2) Мету роботи.
- 3) Завдання на домашнє дослідження та їхні результати.
- 4) Завдання на лабораторне дослідження.
- 5) Результати лабораторних досліджень.
- 6) Висновки.

Висновки по роботі повинні мати як констатуючу частину, яка відображає тиме основні отримані результати, так і аналітичну, в якій проводиться порівняльний аналіз даних теоретичного й експериментального досліджень, а також пояснення отриманих результатів.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

«Вимірювання КСХН, модуля та аргументу коефіцієнта відбиття»

2.1 Домашнє завдання

1) Вивчіть теоретичні положення (ключові положення), використовуючи методичні вказівки, конспект лекцій та рекомендовану літературу.

2) **Розв'яжіть задачу.** В результаті проведених вимірювань параметрів НВЧ пристрою (коаксіального атенюатора) за допомогою векторного вимірювача Р4-37 на частоті f отримані відповідні значення КСХН, модуля $|\Gamma|$ та аргументу φ коефіцієнта відбиття. Вимірювання відбувались у робочих умовах експлуатації без дії впливаючих факторів.

Розрахуйте значення відносної похибки вимірювання усіх отриманих параметрів, якщо їх числові значення дорівнюють:

$$f = 210 + 20 \cdot (n + m), \text{ МГц}; \quad K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}} = 1,2 + 0,01 \cdot (n - m),$$

$$|\Gamma| = \frac{0,2 + 0,01 \cdot (n - m)}{2,2 + 0,01 \cdot (n - m)}; \quad \varphi = \pi + 0,1 \cdot \pi \cdot n - 0,1 \cdot \pi \cdot m \text{ рад},$$

де n, m – остання та передостання цифри номера залікової книжки відповідно.

Приклад вибору вихідних даних. Нехай останні цифри номера залікової книжки 83, тоді $m = 8$, $n = 3$ і відповідно численні значення всіх отриманих параметрів:

$$f = 210 + 20 \cdot (3 + 8) = 430 \text{ МГц}; \quad K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}} = 1,2 + 0,01 \cdot (3 - 8) = 1,15.$$

$$|\Gamma| = \frac{0,2 + 0,01 \cdot (3 - 8)}{2,2 + 0,01 \cdot (3 - 8)} = 0,07; \quad \varphi = \pi + 0,1 \cdot \pi \cdot 3 - 0,1 \cdot \pi \cdot 8 = 0,5\pi \text{ рад}.$$

Методичні вказівки до розв'язання домашньої задачі. Для розрахунку значень відносної похибки вимірювання всіх отриманих параметрів можна скористатись формулами відповідних пунктів $\Delta f - 3$), $\delta K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}}$ и $\delta \Gamma_x - 6$), $\Delta \varphi \Gamma_x - 8$) (див. Технічні дані вимірювача Р4-37).

3) Підготуйте відповіді на ключові питання (питання для допуску та до захисту лабораторної роботи).

4) Вивчіть інструкцію з експлуатації векторного вимірювача Р4-37 (див. Додаток А, п. А.1, А.3.1 та А.3.2).

5) Підготуйте бланк звіту з лабораторної роботи, який містить у собі титульний лист установленого зразка (див. Додаток В), мету роботи (див. 1.1), розв'язання задачі, структурну схему векторного вимірювача Р4-37 для вимірювання вхідних параметрів (див. Додаток А, рис. А.1).

2.2 Лабораторне завдання

1) Підготуйте векторний вимірювач Р4-37 до вимірювання вхідних параметрів (див. Додаток А, А.1).

2) Зафіксуйте значення мінімального рівня напруги опорного каналу.

3) Виконайте вимірювання КСХН, модуля та аргументу коефіцієнта відбиття входу НВЧ пристрою (див. Додаток А, А.3.1, 3.2) на частоті

$$f = 210 + 20 \cdot (n + m), \text{ МГц,}$$

де n, m – остання та передостання цифри номера залікової книжки відповідно.

Досліджуваний НВЧ пристрій видається викладачем, який проводить лабораторне заняття.

2.3 Питання до захисту лабораторної роботи

1) Назвіть та поясніть основні етапи підготовки векторного вимірювача Р4-37 до вимірювання вхідних параметрів. Який мінімальний рівень напруги опорного каналу?

2) Поясніть структурну схему векторного вимірювача Р4-37 для вимірювання вхідних параметрів, особливості включення рефлектометра.

3) Як відбувається вимірювання КСХН за допомогою векторного вимірювача Р4-37?

4) Як відбувається вимірювання модуля та аргументу коефіцієнта відбиття за допомогою векторного вимірювача Р4-37?

5) Як взаємозалежні модуль коефіцієнта відбиття та КСХН?

6) Як визначається та від чого залежить похибка вимірювання частоти?

7) Як визначається та від чого залежить похибка вимірювання КСХН?

8) Як визначається та від чого залежить похибка вимірювання модуля коефіцієнта відбиття?

9) Як визначається та від чого залежить похибка вимірювання аргументу коефіцієнта відбиття?

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

«Вимірювання модуля та аргументу коефіцієнта передачі»

3.1 Домашнє завдання

1) Вивчіть теоретичні положення (ключові положення), використовуючи методичні вказівки, конспект лекцій та рекомендовану літературу.

2) **Розв'яжіть задачу.** В результаті проведених вимірювань параметрів НВЧ пристрою (коаксіального атенюатора) за допомогою векторного вимірювача Р4-37 на частоті f отримані відповідні значення послаблення (модуля коефіцієнта передачі) A_x та аргументу коефіцієнта передачі φ . Вимірювання відбувались у робочих умовах експлуатації без дії впливаючих факторів при КСХН входу та виходу НВЧ пристроїв не більш ніж 1,3 дБ.

Розрахуйте значення відносної похибки вимірювання усіх отриманих параметрів:

$$A_x = 20 + n - m, \text{ дБ}; \quad \varphi = 90 - 5 \cdot m, \text{ град.}$$

де n, m – остання та передостання цифри номера залікової книжки відповідно.

Приклад вибору вихідних даних. Нехай останні цифри номера залікової книжки 83, тоді $m = 8$, $n = 3$ і відповідно численні значення усіх отриманих параметрів:

$$A_x = 20 + 3 - 8 = 15 \text{ дБ}; \quad \varphi = 90 - 5 \cdot 8 = 50 \text{ град.}$$

Методичні вказівки до розв'язання домашньої задачі. Для розрахунку значень відносної похибки вимірювання усіх отриманих параметрів можна скористатись формулами відповідних пунктів $\Delta A_x - 12$), $\Delta \varphi A_x - 15$) (див. Технічні дані вимірювача Р4-37).

3) Підготуйте відповіді на ключові питання (питання до допуску та до захисту лабораторної роботи).

4) Вивчіть інструкцію з експлуатації векторного вимірювача Р4-37 (див. Додаток А, А.2, А.4.1 – А.4.3).

5) Підготуйте бланк звіту з лабораторної роботи, який містить у собі титульний лист установленого зразка (див. Додаток В), мету роботи (див. 1.1), розв'язання задачі, структурну схему векторного вимірювача Р4-37 для вимірювання прохідних параметрів (див. Додаток А, рис. А.2).

3.2 Лабораторне завдання

1) Підготуйте векторний вимірювач Р4-37 до вимірювання прохідних параметрів (див. Додаток А., А.2).

2) Зафіксуйте значення мінімального рівня напруги опорного каналу.

3) Виконайте вимірювання модуля та аргументу коефіцієнта передачі входу НВЧ пристрою (див. Додаток А., А.4.1) на частоті

$$f = 210 + 20 \cdot (n + m), \text{ МГц,}$$

де n, m – остання та передостання цифри номера залікової книжки відповідно.

Досліджуваний НВЧ пристрій видається викладачем, який проводить лабораторне заняття.

3.3 Питання до захисту лабораторної роботи

1) Назвіть та поясніть основні етапи підготовки векторного вимірювача Р4-37 до вимірювання прохідних параметрів. Який мінімальний рівень напруги опорного каналу?

2) Поясніть структурну схему векторного вимірювача Р4-37 для вимірювання прохідних параметрів, особливості включення вимірювальних НВЧ вузлів.

3) Як відбувається вимірювання послаблення від +10 до –40 дБ та аргументу коефіцієнта передачі за допомогою векторного вимірювача Р4-37?

4) Як відбувається вимірювання послаблення понад –40 дБ за допомогою векторного вимірювача Р4-37?

5) Як відбувається вимірювання підсилення до 30 дБ за допомогою векторного вимірювача Р4-37?

6) Як визначається та від чого залежить похибка вимірювання модуля коефіцієнта передачі?

7) Як визначається та від чого залежить похибка вимірювання аргументу коефіцієнта передачі?

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА «Вимірювання повних опорів»

4.1 Домашнє завдання

1) Вивчіть теоретичні положення (ключові положення), використовуючи методичні вказівки, конспект лекцій та рекомендовану літературу.

2) **Розв'яжіть задачу.** В результаті проведених вимірювань параметрів НВЧ пристрою (коаксіального атенюатора) за допомогою векторного вимірювача Р4-37 на частоті f отримані відповідні значення модуля та аргументу коефіцієнта відбиття. Вимірювання відбувались у робочих умовах експлуатації без дії впливаючих факторів.

Розрахуйте значення нормованого вхідного опору $Z = R + iX$ НВЧ пристрою та відносні похибки вимірювання складових вхідного опору δR та δX , якщо їх чисельні значення модуля $|\Gamma|$ та аргументу φ коефіцієнта відбиття відповідно дорівнюють:

$$|\Gamma| = 0,01 + 0,05 \cdot (n + m); \quad \varphi = \pi + 0,1 \cdot \pi \cdot n - 0,1 \cdot \pi \cdot m \text{ рад},$$

де n, m – остання та передостання цифри номера залікової книжки відповідно.

Приклад вибору вихідних даних. Нехай останні цифри номера залікової книжки 83, тоді $m = 8$ і $n = 3$ та відповідно чисельні значення усіх отриманих параметрів:

$$|\Gamma| = 0,01 + 0,05 \cdot (3 + 8) = 0,56; \quad \varphi = \pi + 0,1 \cdot \pi \cdot 3 - 0,1 \cdot \pi \cdot 8 = 0,5\pi \text{ рад}.$$

Методичні вказівки до розв'язання домашньої задачі. Для розрахунку значення нормованого вхідного опору $Z = R + iX$ НВЧ пристрою можна скористатись (1.1) або після перетворення (1.1) наступним виразом

$$\begin{aligned} Z = R + iX &= \frac{1 + |\Gamma| \exp(i\varphi)}{1 - |\Gamma| \exp(i\varphi)} = \\ &= \frac{1 + |\Gamma|^2}{1 - 2|\Gamma| \cos(\varphi) + |\Gamma|^2} + i \frac{2|\Gamma| \sin(\varphi)}{1 - 2|\Gamma| \cos(\varphi) + |\Gamma|^2}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Для розрахунку значень відносних похибок вимірювання складових вхідного опору δR та δX можна скористатись виразами:

$$\delta R = \pm |\operatorname{Re}(\delta Z)|; \quad \delta X = \pm |\operatorname{Im}(\delta Z)|, \quad (4.2)$$

де

$$\delta Z = \frac{0,04 + 0,2|\Gamma|^2}{\left[1 - |\Gamma|^2 \exp(i2\varphi)\right] \exp(-i(\varphi + \pi/4))}. \quad (4.3)$$

3) Вивчіть особливості використання діаграми Вольперта-Сміта (див. Додаток Б).

4) Підготуйте відповіді на ключові питання (питання для допуску та до захисту лабораторної роботи).

5) Вивчіть інструкцію з експлуатації векторного вимірювача Р4-37 (див. Додаток А, п. А1, А3.3).

6) Підготуйте бланк звіту з лабораторної роботи, який містить в собі титульний лист установленого зразка (див. Додаток В), мету роботи (див. 1.1), розв'язання задачі, структурну схему векторного вимірювача Р4-37 для вимірювання входних параметрів (див. Додаток А, рис. А.1).

4.2 Лабораторне завдання

1) Підготуйте векторний вимірювач Р4-37 до вимірювання входних параметрів (див. Додаток А, А.1).

2) Зафіксуйте значення мінімального рівня напруги опорного каналу.

3) Виконайте вимірювання складових R та X нормованого входного опору НВЧ пристрою (див. Додаток А., А.3.3) на частоті

$$f = 210 + 20 \cdot (n + m), \text{ МГц},$$

де n, m – остання та передостання цифри номера залікової книжки відповідно.

Досліджуваний НВЧ пристрій видається викладачем, який проводить лабораторне заняття.

4) Визначте значення входного опору НВЧ пристрою з урахуванням хвильового опору вимірювального тракту (див. Додаток Б).

4.3 Питання до захисту лабораторної роботи

1) Назвіть та поясніть основні етапи підготовки векторного вимірювача Р4-37 до вимірювання входних параметрів. Який мінімальний рівень напруги опорного каналу?

2) Поясніть структурну схему векторного вимірювача Р4-37 для вимірювання входних параметрів, особливості включення рефлектометра.

3) Як проводиться вимірювання повного опору за допомогою векторного вимірювача Р4-37?

4) Що таке діаграма Вольперта-Сміта? Поясніть її основні осі.

5) Як за показами на діаграмі Вольперта-Сміта визначити повний опір?

6) Обчисліть повний опір лінії передачі з хвильовим опором $Z_a = 50 \text{ } \Omega$ позначений на діаграмі Вольперта-Сміта відповідною точкою. Місце положення точки на діаграмі Вольперта-Сміта задається викладачем.

7) Виведіть формулу (4.1).

8) Виведіть формули (4.2) та (4.3).

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

«Вимірювання ГЧЗ відбитої хвилі»

5.1 Домашнє завдання

1) Вивчіть теоретичні положення (ключові положення), використовуючи методичні вказівки, конспект лекцій та рекомендовану літературу.

2) **Розв'яжіть задачу.** В результаті проведених вимірювань параметрів НВЧ пристрою (коаксіального атенюатора) за допомогою векторного вимірювача Р4-37 на частоті f отримані відповідні значення групового часу затримки (ГЧЗ) відбитої хвилі τ_0 та модуля коефіцієнта відбиття $|\Gamma|$. Вимірювання відбувались у смузі частот F у робочих умовах експлуатації без дії впливаючих факторів.

Розрахуйте значення відносної похибки вимірювання ГЧЗ відбитої хвилі, якщо численні значення вимірюваних параметрів дорівнюють:

$$\tau_0 = 40 + n - m, \text{ нс}; \quad |\Gamma| = 0,01 + 0,05 \cdot (n + m);$$

$$F = 100 + n - m, \text{ МГц},$$

де n, m – остання та передостання цифри номера залікової книжки відповідно.

Приклад вибору вихідних даних. Нехай останні цифри номера залікової книжки 83, тоді $m = 8, n = 3$ і відповідно численні значення усіх отриманих параметрів:

$$\tau_0 = 40 + 3 - 8 = 35, \text{ нс}; \quad |\Gamma| = 0,01 + 0,05 \cdot (3 + 8) = 0,56;$$

$$F = 100 + 3 - 8 = 95, \text{ МГц}.$$

Методичні вказівки до розв'язання домашньої задачі. Для розрахунку значення відносної похибки вимірювання ГЧЗ відбитої хвилі можна скористатись формулою

$$\delta\tau_0 = \pm \sqrt{\delta\tau_1^2 + \delta\tau_2^2 + \delta\tau_3^2} \cdot 100, \%, \quad (5.1)$$

де $\delta\tau_1 = \Delta\tau/\tau_0$ – методична похибка; τ_0 – вимірюване значення ГЧЗ, нс; $\Delta\tau = 0,02/F$ – чутливість вимірювача за ГЧЗ, нс; F – смуга частот, у якій проведено вимірювання, ГГц; $\delta\tau_2 = 0,07|\Gamma|$ – похибка через неузгодженість; $\delta\tau_3 = 0,03$ – апаратна похибка, похибка перетворення фазочастотної характеристики в ГЧЗ.

Після перетворень (5.1) можна подати у вигляді:

$$\delta\tau_0 = \pm \sqrt{0,0004/(F\tau_0)^2 + 0,0049|\Gamma|^2 + 0,0009} \cdot 100, \% , \quad (5.2)$$

де F , ГГц; τ_0 , нс.

3) Підготуйте відповіді на ключові питання (питання для допуску та до захисту лабораторної роботи).

4) Вивчіть інструкцію з експлуатації векторного вимірювача Р4-37 (див. Додаток А, А1, А3.4).

5) Підготуйте бланк звіту з лабораторної роботи, який містить у собі титульний лист установленого зразка (див. Додаток В), мету роботи (див. 1.1), розв'язання задачі, структурну схему векторного вимірювача Р4-37 для вимірювання вхідних параметрів (див. Додаток А, рис. А.1).

5.2 Лабораторне завдання

1) Підготуйте векторний вимірювач Р4-37 до вимірювання вхідних параметрів (див. Додаток А, А.1) в діапазоні

$$F = f_{\text{ЕЗІ}} - f_{\text{ПХ}} ,$$

де $f_{\text{ПХ}} = f - F/2$, МГц; $f_{\text{ЕЗІ}} = f + F/2$, МГц;

$F = 100 + n - m$, МГц, $f = 210 + 20 \cdot (n + m)$, МГц; n, m — остання та передостання цифри номера залікової книжки відповідно.

2) Зафіксуйте значення мінімального рівня напруги опорного каналу.

3) Здійсніть вимірювання ГЧЗ відбитої хвилі НВЧ пристрою (див. Додаток А, А.3.4) на частоті

$$f = 210 + 20 \cdot (n + m), \text{ МГц},$$

де n, m — остання та передостання цифри номера залікової книжки відповідно.

Досліджуваний НВЧ пристрій видається викладачем, який проводить лабораторне заняття.

5.3 Питання до захисту лабораторної роботи

1) Назвіть та поясніть основні етапи підготовки векторного вимірювача Р4-37 до вимірювання вхідних параметрів. Який мінімальний рівень напруги опорного каналу?

2) Поясніть структурну схему векторного вимірювача Р4-37 для вимірювання вхідних параметрів, особливості включення рефлектометра.

3) Як відбувається вимірювання ГЧЗ відбитої хвилі за допомогою векторного вимірювача Р4-37?

4) Як визначається та від чого залежить похибка вимірювання ГЧЗ відбитої хвилі?

6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА «Вимірювання ГЧЗ чотириполіусників»

6.1 Домашнє завдання

1) Вивчіть теоретичні положення (ключові положення), використовуючи методичні вказівки, конспект лекцій та рекомендовану літературу.

2) **Розв'яжіть задачу.** В результаті проведених вимірювань параметрів НВЧ пристрою (коаксіального атенюатора) за допомогою векторного вимірювача Р4-37 на частоті f отримані відповідні значення групового часу затримки (ГЧЗ) НВЧ пристрою $\tau_{\text{іаδ}}$ та послаблення (модуля коефіцієнта передачі) $A_{\text{іаδ}}$. Вимірювання відбувались у смузі частот F у робочих умовах експлуатації без дії впливаючих факторів.

Розрахуйте значення похибки вимірювання ГЧЗ НВЧ пристрою, якщо чисельні значення вимірюваних параметрів дорівнюють:

$$\tau_{\text{іаδ}} = 40 + n - m, \text{ нс}; \quad A_{\text{іаδ}} = 20 + n - m, \text{ дБ};$$

$$F = 100 + n - m, \text{ МГц};$$

$$|\Gamma_{11}| = 0,1 + 0,005 \cdot (n + m); \quad |\Gamma_{22}| = 0,19 - 0,005 \cdot (n + m);$$

$$\tau_{0_{11}} = 60 + n - m, \text{ нс}; \quad \tau_{0_{22}} = 60 + m - n, \text{ нс},$$

де n, m – остання та передостання цифри номера залікової книжки відповідно; $|\Gamma_{11}|$, $\tau_{0_{11}}$ – модуль коефіцієнта відбиття та ГЧЗ відбитої хвилі вимірюваного чотириполіусника з боку входу відповідно; $|\Gamma_{22}|$, $\tau_{0_{22}}$ – модуль коефіцієнта відбиття та ГЧЗ відбитої хвилі вимірюваного чотириполіусника з боку виходу відповідно.

Приклад вибору вихідних даних. Нехай останні цифри номера залікової книжки 83, тоді $m = 8$, $n = 3$ і відповідно чисельні значення усіх отриманих параметрів:

$$\tau_{\text{іаδ}} = 40 + 3 - 8 = 35, \text{ нс}; \quad A_{\text{іаδ}} = 20 + 3 - 8 = 15, \text{ дБ};$$

$$F = 100 + 3 - 8 = 95, \text{ МГц};$$

$$|\Gamma_{11}| = 0,01 + 0,005 \cdot (3 + 8) = 0,155; \quad |\Gamma_{22}| = 0,19 - 0,005 \cdot (3 + 8) = 0,135;$$

$$\tau_{0_{11}} = 60 + 3 - 8 = 55, \text{ нс}; \quad \tau_{0_{22}} = 60 + 8 - 3 = 65, \text{ нс}.$$

Методичні вказівки до розв'язання домашньої задачі. Для розрахунку значення основної абсолютної похибки вимірювання ГЧЗ чотириполіусника

при вимірюванні $A_{\text{іаџ}}$ от 0 до –60 дБ та КСХН входу та виходу пристрою не більш ніж 1,3, можна скористатись формулою пункту $\Delta\tau$ – 19) (див. Технічні дані вимірювача Р4-37).

При КСХН входу та виходу пристрою більш ніж 1,3, який може бути визначений на основі формули (1.2), додаткова похибка через розузгодження приблизно дорівнює

$$\delta\tau_{\text{іаџ}} = \pm \frac{0,1}{\tau_{\text{іаџ}}} \sqrt{(\Gamma_{11}|\tau_{0_{11}})^2 + (\Gamma_{22}|\tau_{0_{22}})^2} \cdot 100, \% \quad (6.1)$$

де $\tau_{\text{іаџ}}$, нс — вимірюваний ГЧЗ.

3) Підготуйте відповіді на ключові питання (питання для допуску та до захисту лабораторної роботи).

4) Вивчіть інструкцію з експлуатації векторного вимірювача Р4-37 (див. Додаток А, А2, А4.4).

5) Підготуйте бланк звіту з лабораторної роботи, який містить у собі титульний лист установленого зразка (див. Додаток В), мету роботи (див. 2.1), розв'язання задачі, структурну схему векторного вимірювача Р4-37 для вимірювання прохідних параметрів (див. Додаток А, рис. А.2).

6.2 Лабораторне завдання

1) Підготуйте векторний вимірювач Р4-37 до вимірювання прохідних параметрів (див. Додаток А, А.2) в діапазоні

$$F = f_{\hat{\text{Е}}^2\hat{\text{І}}} - f_{\hat{\text{І}}^2\hat{\text{Е}}},$$

де $f_{\hat{\text{І}}^2\hat{\text{Е}}} = f - F/2$, МГц; $f_{\hat{\text{Е}}^2\hat{\text{І}}} = f + F/2$, МГц;

$F = 100 + n - m$, МГц, $f = 210 + 20 \cdot (n + m)$, МГц; n, m — остання та передостання цифри номеру залікової книжки відповідно.

2) Зафіксуйте значення мінімального рівня напруги опорного каналу.

3) Здійсніть вимірювання ГЧЗ НВЧ пристрою (див. Додаток А, А.4.4) на частоті

$$f = 210 + 20 \cdot (n + m), \text{ МГц},$$

де n, m — остання та передостання цифри номера залікової книжки відповідно.

Досліджуваний НВЧ пристрій видається викладачем, який проводить лабораторне заняття.

6.3 Питання до захисту лабораторної роботи

- 1) Назвіть та поясніть основні етапи підготовки векторного вимірювача Р4-37 до вимірювання прохідних параметрів. Який мінімальний рівень напруги опорного каналу?
- 2) Поясніть структурну схему векторного вимірювача Р4-37 для вимірювання прохідних параметрів, особливості включення вимірювальних НВЧ вузлів.
- 3) Як відбувається вимірювання ГЧЗ чотирьохполосника за допомогою векторного вимірювача Р4-37?
- 4) Як взаємозалежать модуль коефіцієнта відбиття та КСХН?
- 5) Як визначається та від чого залежить похибка вимірювання ГЧЗ чотирьохполосника при КСХН входу та виходу пристрою не більш ніж 1,3?
- 6) Як визначається та від чого залежить додаткова похибка вимірювання ГЧЗ чотирьохполосника при КСХН входу та виходу пристрою понад 1,3?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

- 1) Винокуров В.И. Электрорадиоизмерения: учеб. пособ. [для радиотехнич. спец. Вузов] / Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г.; под ред. В.И. Винокурова. — [2-е изд., перераб. и доп.]. — М.: Высшая школа, 1986. — 351 с.
- 2) Фрадин А.З. Измерения параметров антенно-фидерных устройств /А. З. Фрадин, Е. В. Рыжков. — [2-е изд., доп.]. — М.: Связь, 1972. — 352 с.
- 3) White J. F. High frequency techniques. An introduction to RF and microwave engineering / White J. F. — A John Wiley & Sons, 2004. — 526 p.
- 4) Dehe A. Microwave measurements / [A. Dehe, K. Beilenhoff, K. Fricke et. al.]. — CRC Press LLC, 2000. — 25 p.
- 5) Ghannouchi F.M. The six-port technique with microwave and wireless applications / Fadhel M. Ghannouchi, Abbas Mohammadi. — Artech House, 2009. — 245 p.

Додаток А

Інструкція з експлуатації векторного вимірювача Р4-37

А.1 Підготовка до проведення вимірювань входних параметрів

- 1) Зберіть схему за рис. А.1.
- 2) Установіть органи керування блока індикаторного (БІ) та генератора хитної частоти (ГХЧ4) у наступне положення:
 - ручку «**МЕТКА**» у середнє положення;
 - ручку «**УРОВЕНЬ**» у середнє положення.
- 3) Увімкніть блоки в мережу та прогрійте протягом 15 хв.
- 4) Натисніть кнопку ОБЦ. «**×**» два рази.
- 5) Натисніть кнопку «**|S|**» (КАНАЛЫ), у верхній частині екрана електро-нно-променевої трубки (ЕПТ) повинен висвітитись напис ДИАПАЗОН «**?**».
- 6) Натисніть кнопку «**F1**» — погасне запис ДИАПАЗОН «**?**» та з'явиться у нижньому лівому кутку ЕПТ знак «**?**».
- 7) За допомогою цифрових кнопок «**0**», «**1**», «**2**»...«**9**» наберіть потрібне значення початкової частоти ($F1 \geq 0,7$ МГц) смуги перебудови та натисніть кнопку «**■**». На екрані ЕПТ повинен з'явитись напис «**F2=?**».
- 8) Натисніть кнопку «**F2**» — у правому нижньому кутку екрана ЕПТ повинен з'явитись знак «**?**». Смуга перестроювання повинна бути не менш ніж 10 МГц при $f_a \leq 31$ МГц та не менше 50 МГц при $f_a \geq 31$ МГц.
- 9) За допомогою цифрових кнопок «**0**», «**1**», «**2**»...«**9**» наберіть потрібне значення кінцевої частоти смуги перестроювання, крім частот 126...130 МГц і 510...514 МГц, та натисніть кнопку «**■**». Повинен висвітитись напис КАЛИБР РЕЖИМ «**?**».
- 10) Натисніть кнопки «**⌂**» (з'явиться знак «**XX?**»), «**■**». Запис КАЛИБР. РЕЖИМ повинен погаснути та з'явиться напис «**К-А**» та вимірювана величина в децибелах.
- 11) Натисніть кнопку **ОН** (КАНАЛЫ). На екрані ЕПТ повинна індикуватись крива опорного сигналу, а також величина опорної напруги в мілівольтах на частоті позначки та частота позначки.

Примітка. За необхідності роботи в усьому діапазоні частот вимірювача натисніть кнопку « **$\Delta F_{\max}$** ».

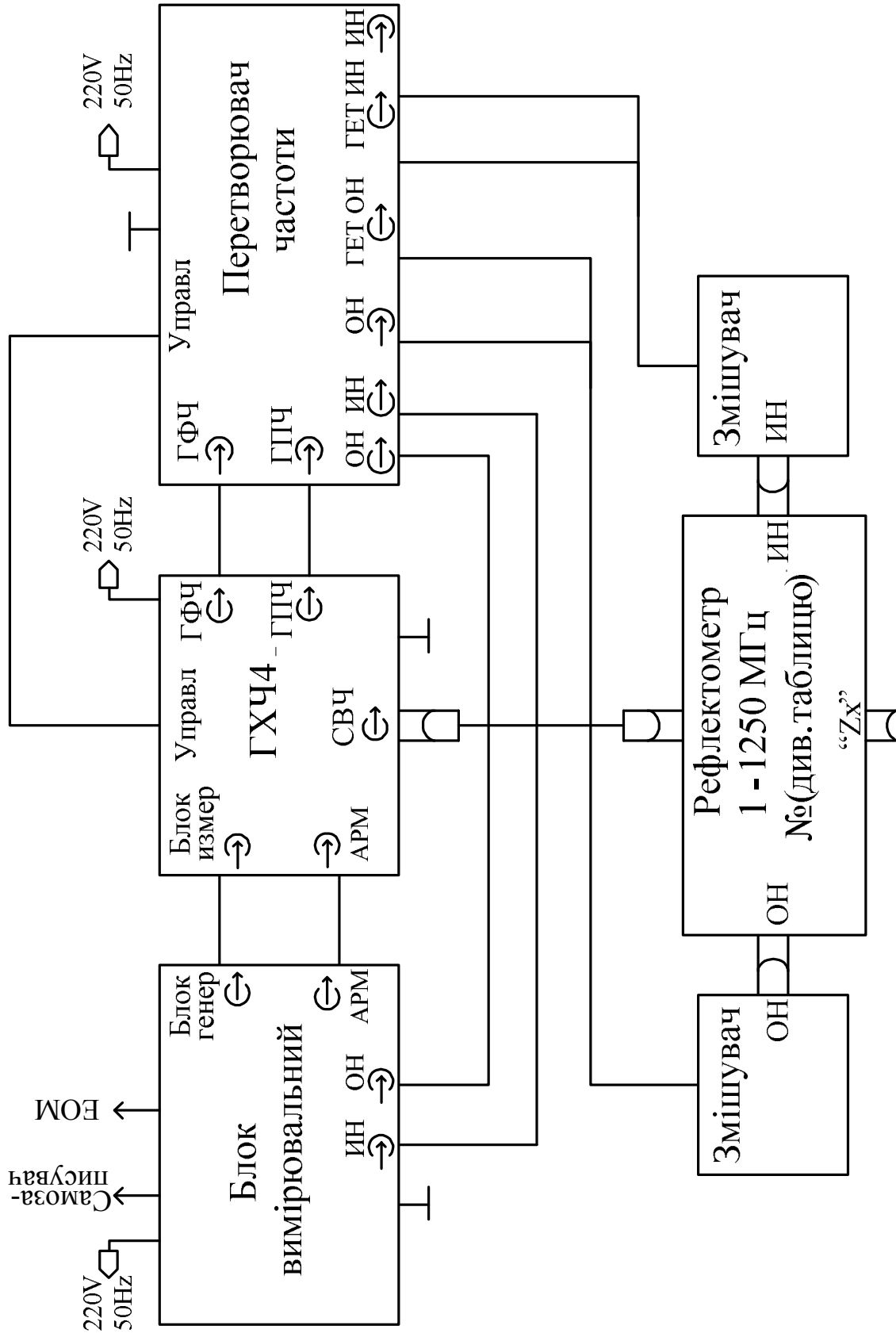


Рисунок А.1 — Структурна схема з'єднань вимірювача Р4-37 при вимірюванні входних параметрів

12) Ручкою **«УРОВЕНЬ»** встановіть напругу опорного каналу рівною $(3,3 \pm 0,1)$ мВ. Якщо на лінії опорного каналу спостерігається модуляція або генерація, тоді усуньте методом послідовного приближення за допомогою осі резистора, виведеної під шліц, та ручкою **«УРОВЕНЬ»**, після цього рівень повинен зберегтись.

Величина опорної напруги $(3,3 \pm 0,1)$ мВ відповідає рівню потужності на вході вимірюваного пристрою порядку $(0,1 \dots 1) \cdot 10^{-6}$ Вт (зміна рівня опорного сигналу в m разів викликає зміну рівня потужності на вході вимірюваного пристрою в m^2 разів).

13.1) Натисніть кнопку **«|S|»** (КАНАЛЫ). Встановіть позначку за допомогою ручки **«МЕТКА»** в мінімум амплітудно-частотної кривої та за допомогою осі резистора **«▷»** на перетворювачі частоти встановіть амплітудно-частотну криву так, щоб максимальне значення кривої не виходило за межі другої зверху лінії, сама крива розміщувалась симетрично відносно четвертої зверху лінії шкали ЕПТ, а на лицьовій панелі вмикались кнопки **«-20»**, **«-20»** (ПРЕДЕЛЫ dB).

13.2) Можлива робота з вимірювачем у ручному режимі. Для цього натисніть кнопки **«»** (після натискання повинен з'явитись у нижній частині екрана запис АТ КАНАЛ **«?»**), **ОН** (ПРЕДЕЛЫ «dB») (повинен погаснути запис АТ КАНАЛ), **«-10»**, **«-20»** ліву, **ОН** (КАНАЛЫ) та ручкою **УРОВЕНЬ** встановіть напругу опорного каналу $(3,3 \pm 0,1)$ мВ. Натисніть кнопку **ИН**, вимкніть **«-10»**, додатково увімкніть **«-20»**, **«|S|»** (КАНАЛЫ). Встановіть за допомогою осі резистора **«▷»** максимальний рівень в потрібні межі.

14) Натисніть кнопку **«Φ»** (КАНАЛЫ). При натисненій кнопці **«|S|»** (КАНАЛЫ) на екрані одночасно будуть спостерігатись амплітудно- та фазо-частотні криві. Якщо кнопку **«|S|»** (КАНАЛЫ) повернути у вихідне положення (підсвічування погасне), то можна спостерігати тільки фазочастотну характеристику.

15) Натисніть кнопку **«Φ»** (ВИД ИЗМЕР) та, переміщуючи ручкою **«МЕТКА»** частотну позначку по кривій, визначте сумарне значення фази. Якщо сумарне значення перевищує 3000° , то, враховуючи напрям, в який бік необхідно повернути фазову характеристику, щоб вирівняти фазову характеристику та скомпенсувати фазовий зсув, натисніть кнопку **«»** або **«»**.

16) Наберіть за допомогою цифрових кнопок необхідне значення кута повороту. Натисніть кнопку **«»**, потім кнопку **«0»** та скомпенсуйте фазовий набіг. Якщо напрямок обертання або крок вибраний невірно, то натисніть кнопку **«»** та виправіть помилку. Таким самим чином за допомогою кнопок **«»**, **«»** перемістіть фазочастотну характеристику до центра екрана ЕПТ.

Для послідовної зміни нахилу або переміщення повторно натисніть кнопки «», «0».

Примітка. При компенсації фазового набігу після натискання однієї з кнопок «», «», «», набір значень на цифрових кнопках можна починати з будь-якої цифри, за винятком «0» та «1». Якщо потрібно набрати число, яке починається з 1, то спочатку натисніть будь-яку кнопку «2», «3»...«9», потім кнопку «», а потім необхідне число.

17) Натисніть кнопку «» на 2...3 с. Повинен з'явитись напис «КЗ-?», при цьому амплітудно-частотна та фазочастотна криві на екрані ЕПТ повинні вирівнятись у межах усієї встановленої смуги з нерівномірністю не більше $\pm 2\%$ по амплітуді $U \pm 1^\circ$ за фазою, що можна перевірити, якщо натиснути кнопку «» або «Ф» (ВИД ИЗМЕР) та переміщуючи ручкою «МЕТКА» частотну позначку вздовж лінії на екрані.

18) Підключіть до рефлектометра короткозамикач (КЗ) та повторно натисніть кнопку «». Повинен погаснути запис «КЗ-?». На цьому закінчується підготовка вимірювача до вимірювань входних параметрів у встановленій смузі частот.

А.2 Підготовка до проведення вимірювань прохідних параметрів

1) При вимірюванні коефіцієнтів передачі A_x від +30 до -80 дБ підготуйте вимірювач відповідно до схеми, зображеної на рис. А.2.

2) Встановіть органи керування блоку індикаторного (БІ) та генератора хвильової частоти (ГХЧ4) у наступному положенні:

- ручку «МЕТКА» у середнє положення;
- ручку «УРОВЕНЬ» у середнє положення.

3) Увімкніть блоки в мережу та прогрійте протягом 15 хв.

4) Натисніть кнопку ОБЩ. «» два рази.

5) Натисніть кнопки «» (КАНАЛЫ), у верхній частині екрана електроно-променевої трубки (ЕПТ) повинен засвітитись запис ДИАПАЗОН «?».

6) Натисніть кнопку «F1» — погасне запис ДИАПАЗОН «?», та з'явиться у нижньому лівому кутку ЕПТ знак « ? ».

7) За допомогою цифрових кнопок «0», «1», «2»...«9» наберіть потрібне значення початкової частоти ($F1 \geq 0,7$ МГц) смуги перестроювання та натисніть кнопку «». На екрані ЕПТ повинен з'явитись запис «F2=?».

8) Натисніть кнопку «F2» — у правому нижньому кутку екрана ЕПТ повинен з'явитись знак «?». Смуга перестроювання повинна бути не менше ніж 10 МГц при $f_a \leq 31$ МГц та не менше 50 МГц при $f_a \geq 31$ МГц.

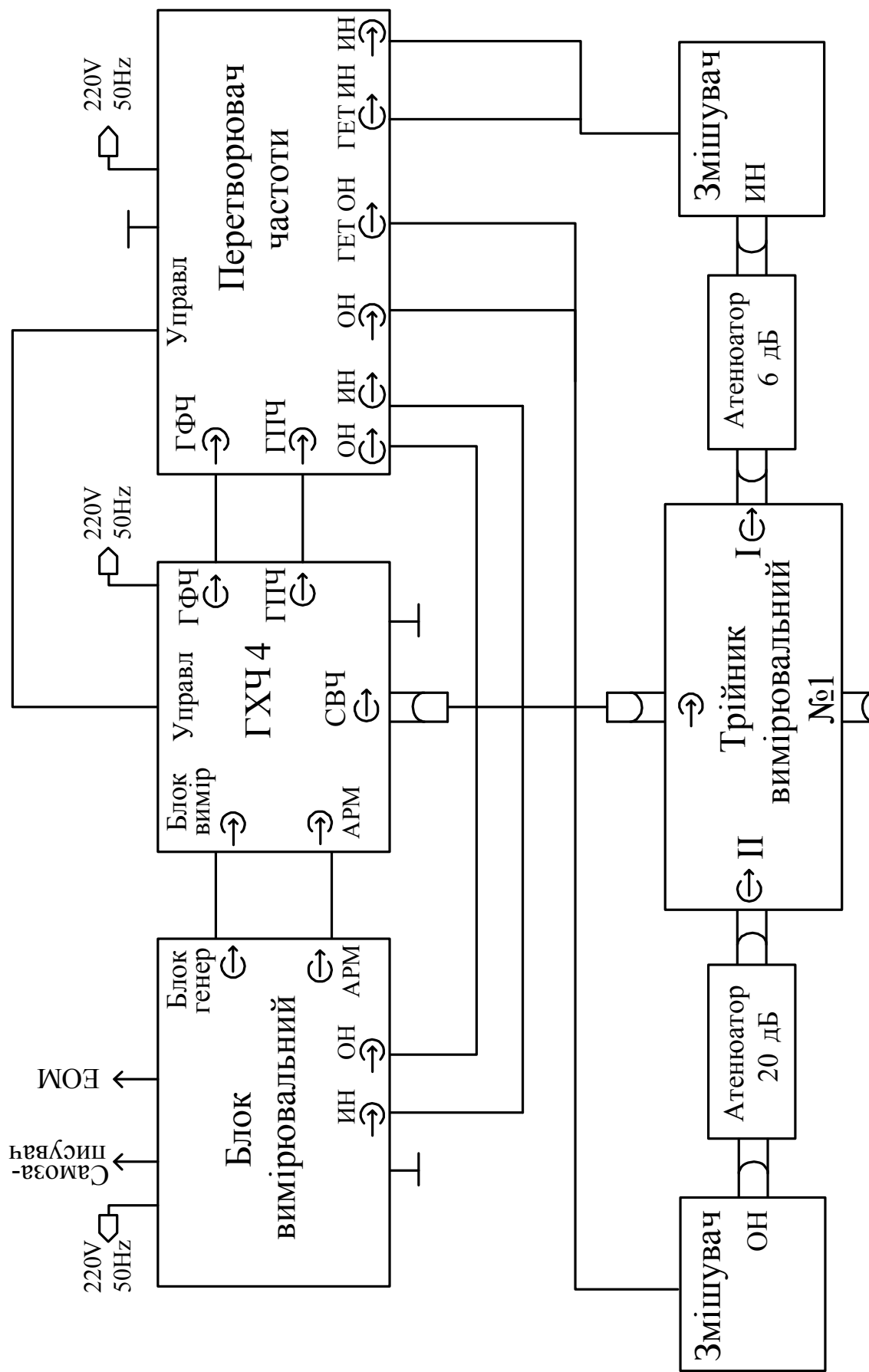


Рисунок А.2 — Структурная схема соединений измерителя Р4-37 при измерении проходных параметров

9) За допомогою цифрових кнопок «0», «1», «2»...«9» наберіть потрібне значення кінцевої частоти смуги перестроювання, крім частот 126...130 МГц та 510...514 МГц і натисніть кнопку «». Повинен засвітитись напис КАЛИБР РЕЖИМ «?».

10) Натисніть кнопку «» та після появи напису КАЛИБР «)-(?)» натисніть кнопку «». На екрані повинна індукуватись амплітудно-частотна крива коефіцієнта передачі. Замість напису КАЛИБР «)-(?)» повинен бути напис «К-А)-(?)».

11) Натисніть кнопку **ОН** (КАНАЛЫ) та за допомогою ручки «УРОВЕНЬ» на ГХЧ4 установіть рівень опорної напруги $(3,3 \pm 0,1)$ мВ. Якщо на лінії опорного каналу спостерігається модуляція або генерація, тоді усуньте методом послідовного приближення за допомогою осі резистора, яка виведена під шліц, та ручкою «УРОВЕНЬ», після цього рівень повинен зберегтись.

Величина опорної напруги $(3,3 \pm 0,1)$ мВ відповідає рівню потужності на вході вимірюваного пристрою порядку $(0,1...1) 10^{-6}$ Вт (зміна рівня опорного сигналу в m разів викликає зміну рівня потужності на вході вимірюваного пристрою в m^2 разів).

12.1) Натисніть кнопку «» (КАНАЛЫ) та за допомогою осі резистора «» на перетворювачі частоти встановіть амплітудно-частотну криву так, щоб максимальне значення кривої не виходило за межі другої зверху лінії, а сама крива розміщувалась симетрично відносно четвертої зверху лінії шкали ЕПТ.

12.2) Можлива робота з вимірювачем у ручному режимі. Для роботи у ручному режимі натисніть, після встановлення потрібної смуги частот, кнопки «», «», **ОН** (ПРЕДЕЛЫ «dB»), «», потім **ОН** (КАНАЛЫ) «-10», «-20» ліву й установіть рівень опорної напруги $(3,3 \pm 0,1)$ мВ. Натисніть кнопку «» (КАНАЛЫ), **ИН** (ПРЕДЕЛЫ «dB») та за допомогою резистора «» установіть максимальний рівень в потрібні межі.

13) Натисніть кнопку «**Ф**» (КАНАЛЫ). За натиснутої кнопки «» (КАНАЛЫ) на екрані одночасно будуть спостерігатись амплітудно-частотна та фазочастотна криві. Якщо кнопку «» (КАНАЛЫ) повернути у вихідне положення (підсвічування погасне), тоді можна буде спостерігати тільки фазочастотну характеристику.

14) Натисніть кнопку «**Ф**» (ВИД ИЗМЕР) та, переміщуючи ручкою «**МЕТКА**» частотну позначку по кривій, визначіть сумарне значення фази. Якщо сумарне значення перевищує 3000° , тоді, враховуючи напрямок, в який бік необхідно повернути фазову характеристику, щоб вирівняти фазову характеристику та скомпенсувати фазовий зсув, натисніть кнопку «» або «».

15) Наберіть за допомогою цифрових кнопок необхідне значення кута повороту. Натисніть кнопку «», потім кнопку «0» та скомпенсуйте фазовий набіг. Якщо напрямок обертання або крок вибраний невірно, то натисніть кнопку «» та виправте помилку. Аналогічним чином за допомогою кнопок «», «» перемістіть фазочастотну характеристику до центру екрана ЕПТ.

Для послідовної зміни нахилу або переміщення повторно натисніть кнопки «», «0».

Примітка. При компенсації фазового набігу після натискання однієї з кнопок «», «», «» «», набір значень на цифрових кнопках можна починати з будь-якої цифри за винятком «0» та «1». Якщо потрібно набрати число, яке починається з 1, то спочатку натисніть будь-яку кнопку «2», «3»...«9», потім кнопку «», а потім необхідне число.

16) Натисніть кнопку «» на 2...3 сек, при цьому амплітудно-частотна та фазочастотна криві на екрані ЕПТ повинні вирівнятися у межах усієї встановленої смуги частот з нерівномірністю не більш ніж $\pm 0,2$ дБ за амплітудою та не більш ніж $\pm 1^\circ$ за фазою (що можна проконтролювати натисканням кнопок « A_x » та « Φ » (ВИД ИЗМЕР) відповідно), а напис К-А повинен погаснути.

17) При вимірюванні A_x від -40 до -80 дБ натисніть кнопку **ОН** (КАНАЛЫ) та за натиснутої кнопки «» поверніть у вихідне положення кнопки **ОН** (ПРЕДЕЛЫ «dB»).

А.3 Вимірювання вхідних параметрів

А.3.1 Вимірювання КСХН та аргументу коефіцієнта відбиття

1) Після калібрування у режимі вимірювання вхідних параметрів (див. А.1) підключіть до рефлектометра замість короткозамкненої муфти вимірюваний пристрій та натисніть кнопку (**КСХН** або « Φ »).

2) Установіть за допомогою ручки «**МЕТКА**» потрібну частоту та проведіть відлік значення вимірюваного параметра.

За необхідності оперативної оцінки частотних залежностей КСХН накладіть на екран ЕПТ відповідну шкалу, яка є у комплекті вимірювача. При цьому необхідно натиснути кнопку «» та одну з кнопок « -10 », « -20 » **ИН** (ПРЕДЕЛЫ «dB»), яка відповідає граничному значенню шкали, яка використовується.

А.3.2 Вимірювання модуля та аргументу коефіцієнта відбиття

1) У вимірювачі введено додатковий режим вимірювання вхідних параметрів — модуля $|\Gamma|$ та аргументу φ коефіцієнта відбиття. Перехід від вимірювання КСХН до вимірювання модуля $|\Gamma|$ здійснюється натисканням відповідної кнопки « $|\Gamma|$ ».

2) На екрані ЕПТ будуть індикуватись криві модуля та аргументу коефіцієнта відбиття у лінійному масштабі. Вимірювання можна проводити у межах усієї комплексної площини вимірювання коефіцієнта відбиття.

А.3.3 Вимірювання повних опорів

Вимірювання та спостереження повних опорів рекомендується проводити у полярній системі координат з використанням діаграм повних опорів (діаграм Вольперта-Сміта), які є у комплекті вимірювача.

1) Після калібрування у режимі вимірювання вхідних параметрів (див. А.1) підключіть до рефлектометра замість короткозамкненої муфти вимірюваний пристрій.

2) Натисканням кнопки «О» здійсніть перехід у полярну систему координат.

3) Накладіть на екран ЕПТ діаграму повних опорів (діаграм Вольперта-Сміта) та сумістіть за допомогою резисторів « $\leftrightarrow$ », « $\updownarrow$ » центр зображення з центром шкал.

Шкали, що накладаються, служать для індикації частотної залежності вимірюваних параметрів, а точний відлік відбувається таким же чином як відлік у декартовій системі координат на частоті позначки при натисканні відповідної кнопки.

4) Натисніть кнопку (R або «X»).

5) Установіть за допомогою ручки «МЕТКА» потрібну частоту та проведіть відлік значення вимірюваного параметра.

А.3.4 Вимірювання ГЧЗ відбитої хвилі

При дослідженні вхідних параметрів пристроїв з великою електричною довжиною ($\lambda/2$ і більше, де λ – довжина хвилі електромагнітного коливання) додаткову інформацію про характеристики пристрою дозволяє отримати вимірювання групового часу затримки (ГЧЗ) відбитої хвилі τ_0 .

Через те, що смуга частот F , у якій наводиться індикація ГЧЗ на краях повинна бути ширше смуги частот вимірювання Δf не менш ніж на 2 %, в першу чергу, необхідно здійснити вибір смуги частот вимірювання Δf , у якій буде відбуватись вимірювання ГЧЗ. Необхідно враховувати, що принцип вимірювання ГЧЗ заснований на зміні зсуву фази $\Delta\phi$ при зміні частоти на ΔF та наступному обчисленні величини

$$\tau = \frac{\Delta\varphi}{2\pi\Delta F},$$

де ΔF — 1/512 частина встановленої смуги вимірювання Δf .

При цьому максимальне значення вимірюваного ГЧЗ τ_0 у наносекундах не повинно перевищувати величин $\tau_0 = 300/\Delta f$ і чутливість вимірювача за ГЧЗ в наносекундах буде дорівнювати $\Delta\tau = 0,02/\Delta f$.

1) Після калібрування у режимі вимірювання вхідних параметрів (див. А.1) підключіть до рефлектометра замість короткозамкненої муфти вимірюваний пристрій.

2) Натисніть кнопку «ГВЗ». Після чого на екрані ЕПТ будуть індикуватись криві $|G|$ та τ_0 , а у верхній частині екрана з'явиться індикація значення τ_0 на частоті позначки.

3) Установіть за допомогою ручки «МЕТКА» потрібну частоту та відрахуйте значення вимірюваного параметра.

А.4 Вимірювання прохідних параметрів

А.4.1 Вимірювання послаблення від +10 до –40 дБ та аргументу коефіцієнта передачі

1) Після калібрування у режимі вимірювання прохідних параметрів при рівні опорної напруги $(3,3 \pm 0,1)$ мВ (див. А.2) увімкніть у вимірювальний канал на виході трійника (між трійником та атенюатором 6 дБ) досліджуваний пристрій та натисніть потрібну кнопку «Ф» (ВИД ИЗМЕР) або «А_х».

2) Установіть за допомогою ручки «МЕТКА» потрібну частоту та проведіть відлік значення вимірюваного параметра.

При роботі у ручному режимі введіть або поверніть у вихідне положення атенюатор каналу ИН.

У випадку вимірювання пристроїв з великим перепадом послаблень можна перейти у логарифмічний режим індикації шляхом натискання кнопки «lg». При цьому одна велика клітка масштабної сітки на екрані ЕПТ буде приблизно відповідати 10 дБ.

А.4.2 Вимірювання послаблення понад –40 дБ

1) Після калібрування у режимі вимірювання прохідних параметрів при рівні опорної напруги $(3,3 \pm 0,1)$ мВ (див. А.2, в тому числі п.17) увімкніть у ви-

мірювальний канал на виході трійника (між трійником та атенюатором 6 дБ) досліджуваний пристрій та натисніть кнопку « A_X ».

При розмиванні кривих на екрані ЕПТ через шуми натисніть кнопку « $\wedge$ », що зменшує смугу частот індикаторної частини вимірювача.

2) Установіть за допомогою ручки «**МЕТКА**» потрібну частоту та відрахуйте значення вимірюваного параметра.

При розкиді показань цифрового індикатора вимірюваного послаблення за результат вимірювання прийміть значення, усереднене за декількома показаннями. Для цього натисніть кнопку « Σ/N », відлік показань проведіть через ~ 10 с.

А.4.3 Вимірювання підсилення до 30 дБ

1) Після калібрування у режимі вимірювання прохідних параметрів при рівні опорної напруги ($3,3 \pm 0,1$) мВ (див. А.2) увімкніть у вимірювальний канал на виході трійника (між трійником та атенюатором 6 дБ) досліджуваний пристрій та натисніть кнопку « A_X ».

2) Установіть ручкою «**МЕТКА**» потрібне значення частоти та перемиканням кнопок «-10», «-20», «-20» за натиснутої кнопки **ИН** (ПРЕДЕЛЫ, «dB») виведіть амплітудно-частотну криву у середню частину екрана та проведіть відлік показань вимірювача.

А.4.4 Вимірювання ГЧЗ чотириполіусників

Через те, що смуга частот F , у якій проводиться індикація групового часу затримки (ГЧЗ) по краях повинна бути ширше смуги частот вимірювання Δf не менш ніж на 2 %, в першу чергу, необхідно здійснити вибір смуги частот вимірювання Δf , у якій будуть проводитись вимірювання ГЧЗ. Необхідно враховувати, що принцип вимірювання ГЧЗ заснований на вимірюванні зсуву фази $\Delta\varphi$ при зміні частоти на ΔF та наступному обчисленні величини

$$\tau = \frac{\Delta\varphi}{2\pi\Delta F},$$

де ΔF — 1/512 частина встановленої смуги вимірювання Δf .

При цьому максимальне значення вимірюваного ГЧЗ $\tau_{\text{іаѡ}}$ в наносекундах не повинно перевищувати величини $\tau_{\text{іаѡ}} = 300/\Delta f$ і чутливість вимірювача по ГЧЗ в наносекундах буде дорівнювати $\Delta\tau = 0,02/\Delta f$.

1) Після калібрування в режимі вимірювання прохідних параметрів при рівні опорної напруги ($3,3 \pm 0,1$) мВ (див. А.2) увімкніть у вимірювальний канал на виході трійника (між трійником та атенюатором 6 дБ) досліджуваний пристрій.

2) Натисніть кнопку «ГВЗ». На екрані ЕПТ будуть спостерігатись криві коефіцієнта передачі та ГВЗ вимірюваного чотириполюсника.

3) Установіть за допомогою ручки «МЕТКА» потрібну частоту та проведіть відлік значення вимірюваного параметра.

Додаток Б

**Діаграма Вольперта-Сміта
(кругова діаграма повних опорів)**

Для графічного зображення повного опору в вимірювачах типу Р4-11, Р4-23 використовується діаграма Вольперта-Сміта (кругова діаграма повних опорів), яка названа на честь радянського вченого А. Р. Вольперта та американського інженера Ф. Сміта, які запропонували діаграму незалежно один від одного в 1939 році (рис. Б.1).

Кругова діаграма являє собою коло, усередині якого розміщені два сімейства ортогональних кіл, що відповідають геометричним місцям точок нормованих опорів $R/Z_B = \text{const}$ і $X/Z_B = \text{const}$, де Z_B — хвильовий опір вимірювального тракту.

Застосування нормованих опорів дозволяє застосовувати діаграму для вимірювання повних опорів з будь-яким хвильовим опором Z_B вимірювального тракту. По вертикальному діаметру відкладені значення R/Z_B , що відповідають колам рівних активних опорів, які пройшли через них. У місцях перетину кіл рівних реактивних опорів із зовнішнім колом вміщено значення X/Z_B : у лівій половині діаграми негативні, в правій — позитивні.

Повний опір визначається за діаграмою Вольперта-Сміта в наступному порядку. Знаходять точку перетину з двома ортогональними колами R/Z_B та X/Z_B . Значення R/Z_B та X/Z_B , що відповідають цьому перерізу, після помноження на Z_B дозволяють визначити $\underline{Z} = R + iX$.

Як приклад на рис. Б.2 зображені діаграми Вольперта-Сміта з позначеними на них значеннями повного нормованого опору $\underline{Z}/Z_B = R/Z_B + iX/Z_B$. Зокрема, точка перерізу пунктирних ліній на рис. Б.2,а визначає значення $\underline{Z}/Z_a = 0,3 - i0,7$, а на рис. Б.2,б відповідно $\underline{Z}/Z_B = 0,7 + i0,8$.

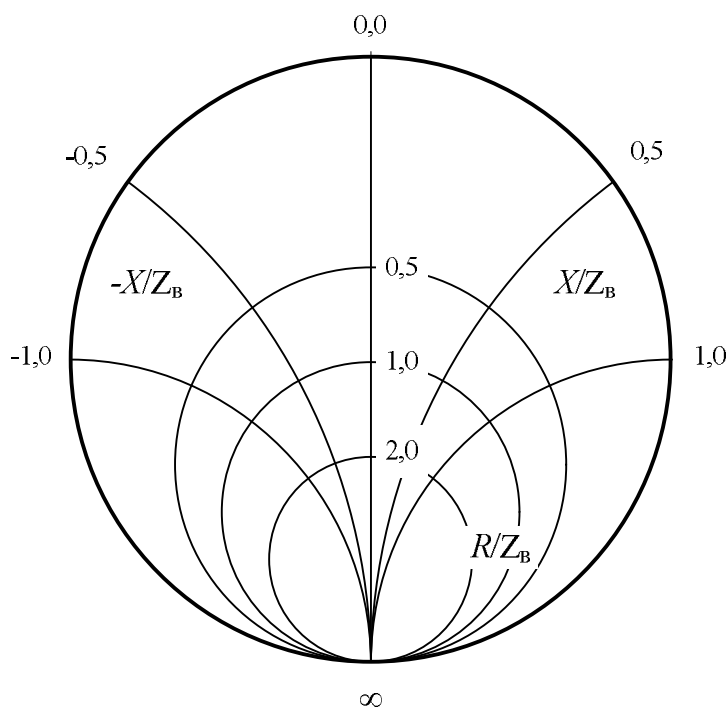


Рисунок Б.1 — Діаграма Вольперта — Сміта
(кругова діаграма повних опорів)

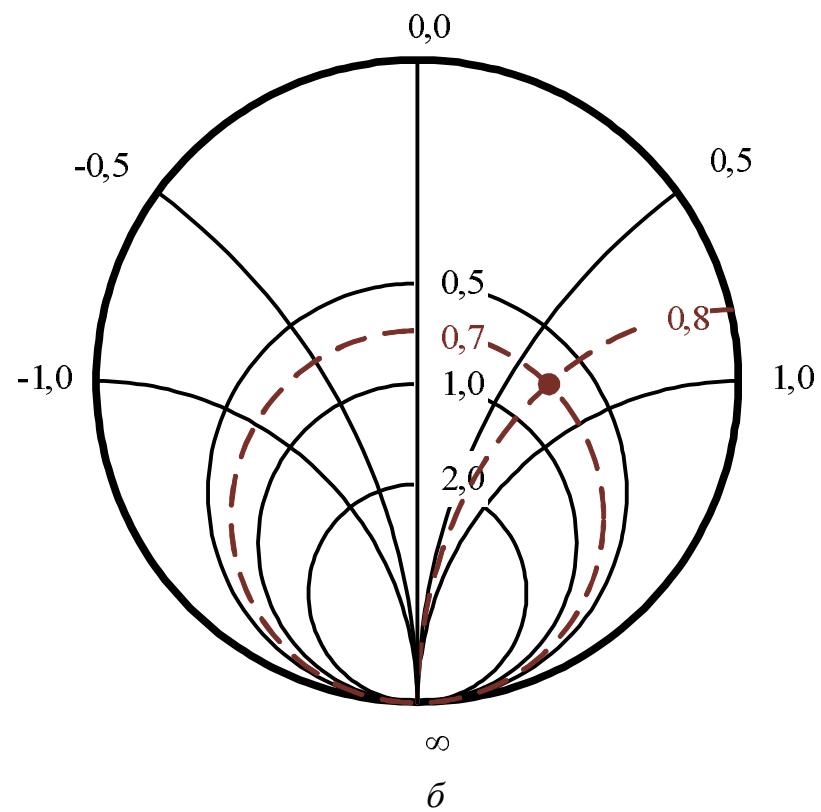
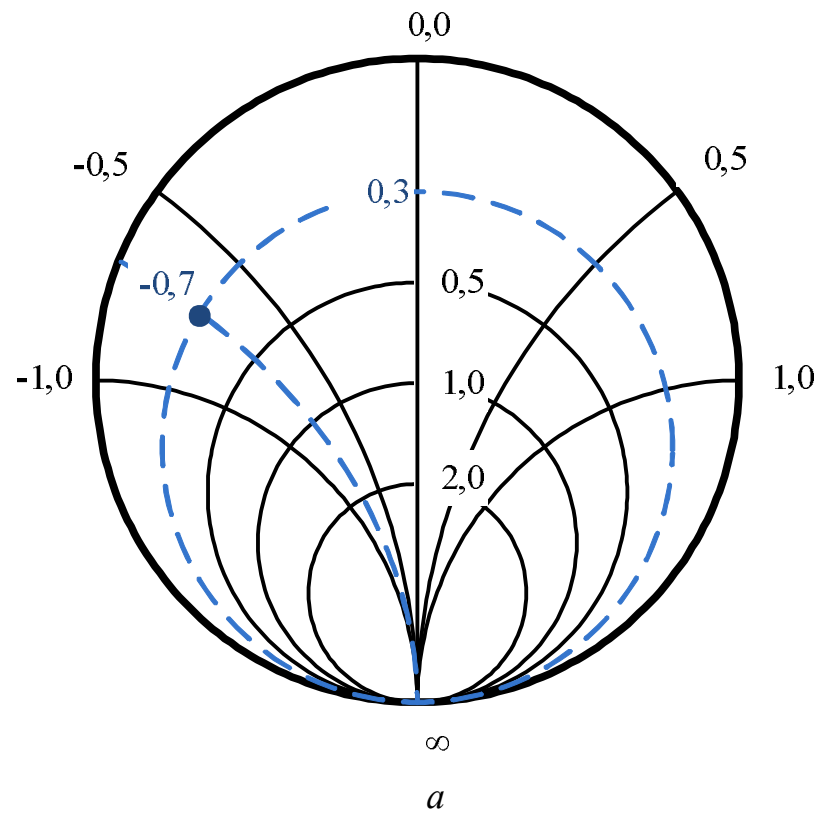


Рисунок Б.2 – Приклади зображення чисельних значень повних опорів на діаграмі Вольперта-Сміта

Додаток В**Титульний лист установленого зразка**

*Міністерство освіти і науки України
Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова*

Кафедра технічної електродинаміки та систем радіозв'язку

ЗВІТ

з лабораторної роботи

*«Вимірювання параметрів мікрохвильових трактів
за допомогою векторного вимірювача Р4-37»*

***Вимірювання КСХН, модуля та аргументу
коефіцієнта відбиття***

*Виконав: студент гр. Р 5.203
Петров Петро Петрович
Номер залікової книжки 000001*

*Перевірів: проф. каф. ТЕД та СРЗ
Проценко М.Б.*

Одеса 2014

СОДЕЖАНИЕ

1 Цикл лабораторных работ «Измерения параметров микроволновых трактов при помощи векторного измерителя Р4-37»	50
1.1 Цель работ	50
1.2 Общие требования к выполнению лабораторных работ	50
1.3 Ключевые положения	50
1.4 Ключевые вопросы для допуска к лабораторным работам	63
1.5 Содержание отчета	64
2 Лабораторная работа «Измерение КСВН, модуля и аргумента коэффициента отражения »	65
2.1 Домашнее задание	65
2.2 Лабораторное задание	66
2.3 Вопросы к защите лабораторной работы	66
3 Лабораторная работа «Измерение модуля и аргумента коэффициента передачи»	67
3.1 Домашнее задание	67
3.2 Лабораторное задание	68
3.3 Вопросы к защите лабораторной работы	68
4 Лабораторная работа «Измерение полных сопротивлений»	69
4.1 Домашнее задание	69
4.2 Лабораторное задание	70
4.3 Вопросы к защите лабораторной работы	70
5 Лабораторная работа «Измерение ГВЗ отраженной волны»	72
5.1 Домашнее задание	72
5.2 Лабораторное задание	73
5.3 Вопросы к защите лабораторной работы	74
6 Лабораторная работа «Измерение ГВЗ четырехполюсников»	75
6.1 Домашнее задание	75
6.2 Лабораторное задание	76
6.3 Вопросы к защите лабораторной работы	77
Рекомендуемая литература	78
Приложение А. Инструкция по эксплуатации векторного измерителя Р4-37	79
А.1 Подготовка к проведению измерений входных параметров	79
А.2 Подготовка к проведению измерений проходных параметров	82
А.3 Измерения входных параметров	85
А.3.1 Измерение КСВН и аргумента коэффициента отражения	85
А.3.2 Измерение модуля и аргумента коэффициента отражения	85
А.3.3 Измерение полных сопротивлений	86
А.3.4 Измерение ГВЗ отраженной волны	86

А.4 Измерения проходных параметров	87
А.4.1 Измерение ослабления от +10 до –40 дБ и аргумента коэффициента передачи	87
А.4.2 Измерение ослабления свыше –40 дБ	88
А.4.3 Измерение усиления до 30 дБ	88
А.4.4 Измерение ГВЗ четырехполюсников	88
Приложение Б. Диаграмма Вольперта-Смита (круговая диаграмма полных сопротивлений)	90
Приложение В. Титульный лист установленного образца	92

1 ЦИКЛ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

«Измерения параметров микроволновых трактов при помощи векторного измерителя Р4-37»

1.1 Цель работ

Целью лабораторных работ является знакомство с устройством и принципом действия векторного измерителя Р4-37, изучение методов его использования для исследования частотных характеристик микроволновых трактов.

1.2 Общие требования к выполнению лабораторных работ

Содержание выполняемых лабораторных работ должно быть предварительно изучено с привлечением теоретического материала из лекционного курса и соответствующей литературы.

Лабораторные работы выполняются бригадами в составе 2 – 4-х студентов, каждый из которых выполняет свое индивидуальное задание.

Отчет составляется каждым студентом и защищается в индивидуальном порядке.

Исходные данные для выполнения заданий исследований выбираются каждым студентом индивидуально в соответствии с предпоследней m и последней n цифрами номера зачетной книжки согласно исходным данным.

1.3 Ключевые положения

Назначение измерителя Р4-37

Измерители комплексных коэффициентов передачи Р4-37 (измерительный тракт 50 Ом, канал 7/3,04 мм), Р4-37/1 (измерительные тракты 50 Ом, каналы 16/6,95 и 7/3,04 мм; 75 Ом канал 16/4,6 мм) (см. рис. 1.1) предназначены для панорамного измерения частотных зависимостей S -параметров коаксиальных многополюсников (ослабления, модуля коэффициента отражения, КСВН, аргументов коэффициентов отражения и передачи) в диапазоне частот от 1 до 1250 МГц с цифровым отсчетом измеряемых величин и воспроизведением их частотных зависимостей на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) в декартовой и полярной системах координат.

Измерители Р4-37, Р4-37/1 также позволяют измерять активную R и реактивную X составляющие полного нормированного входного сопротивления $Z = R + iX$ и групповое время задержки (ГВЗ), вычисляемых по известным алгоритмам из результатов измерения S -параметров.

Измеритель комплексных коэффициентов передачи Р4-37 обеспечивает дополнительные метрологические возможности, такие как:

— исключение погрешности калибровки из результатов измерений;



- одновременный цифровой отсчет полосы частот, частоты измерения и измеряемой величины на этой частоте;
- запоминание исследуемой характеристики и проведение измерений относительно нее;
- измерение ГВЗ и места неисправности в линии передачи;
- диалоговый режим работы с измерителями позволяет произвести обнаружение ошибок и неверные действия оператора при измерениях.

Состав измерителя Р4-37

Конструктивно измеритель комплексных коэффициентов передачи Р4-37 выполнен в настольном варианте. В состав прибора входят следующие основные блоки и узлы:

- блок измерительный;
- генератор качающейся частоты (ГКЧ4);
- преобразователь частоты;
- измерительные СВЧ узлы.

Из узлов и блоков собираются необходимые схемы измерений.

Устройство и принцип работы измерителя Р4-37

Принцип действия измерителя Р4-37 основан на направленном ответвлении падающей на измеряемое устройство и отраженной волн сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала, распространяющихся в измерительном тракте измерителя, селективном преобразовании их в опорный $U_{\text{н}}$ и измеряемый $U_{\text{сч}}$ сигналы промежуточной частоты с помощью следящего гетеродина и формирования трех напряжений, пропорциональных $U_{\text{н}}$, $U_{\text{сч}} \cos \varphi$ и $U_{\text{сч}} \sin \varphi$.

На рис. 1.2 изображена упрощенная структурная схема векторного измерителя Р4-37. Измерители состоят из трех блоков — блока измерительного, ГКЧ4 и преобразователя частоты.

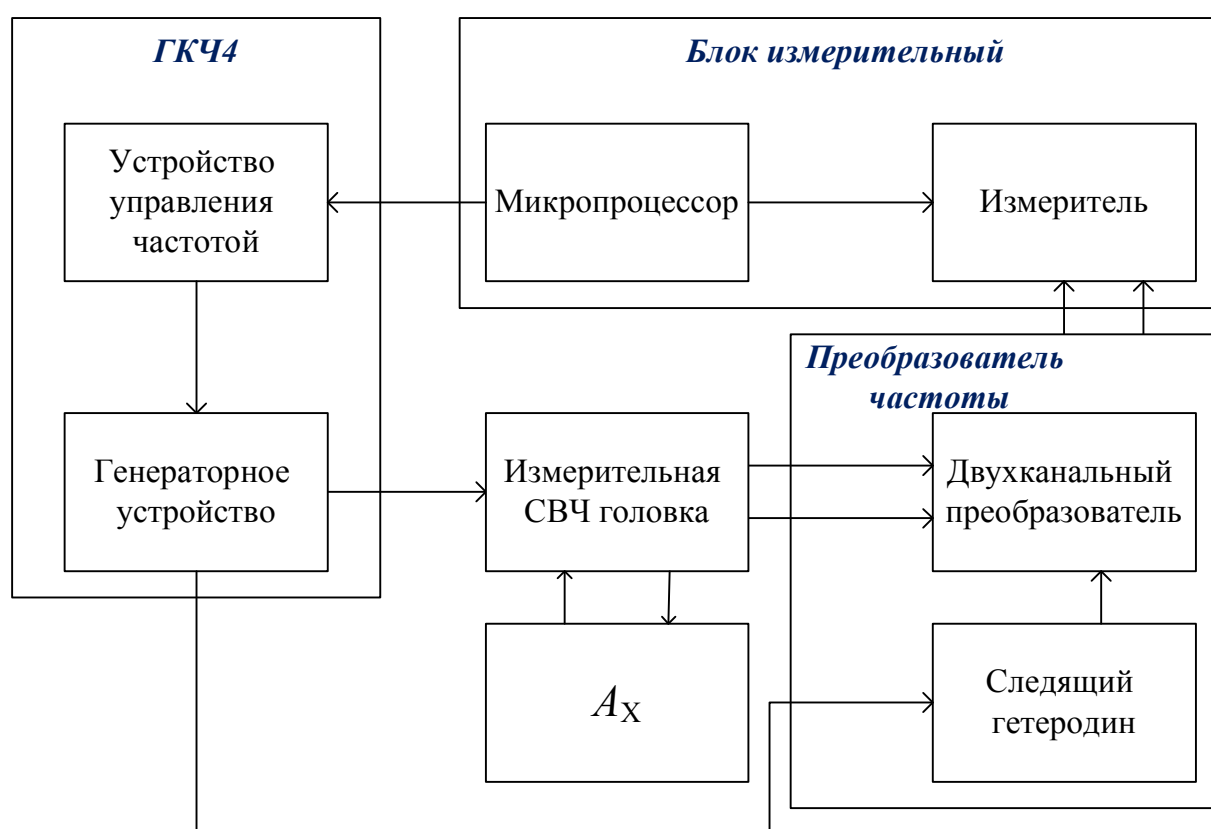


Рисунок 1.2 — Упрощенная структурная схема измерителя Р4-37

ГКЧ4 представляет собой программно-управляемый источник СВЧ-сигнала. Он состоит из непосредственного источника СВЧ-сигнала (генераторного устройства) и схемы управления, стабилизации и измерения частоты (устройства управления частотой).

Команды управления частотой в цифровой форме поступают из микропроцессора блока измерительного.

Выходной сигнал ГКЧ4 поступает на измерительную СВЧ-головку, выделяющую информацию об измеряемом параметре в виде двух сигналов, которые

поступают на входы преобразователя частоты. Постоянство промежуточной частоты выходных сигналов преобразователя частоты обеспечивается автоматическим слежением частоты гетеродина за частотой измерительного сигнала с помощью системы фазовой автоподстройки.

Преобразователь частоты и выносные смесители служат для переноса информации об измеряемой величине с СВЧ измерительного сигнала на промежуточную частоту 100 кГц.

Промежуточная частота 100 кГц поступает на блок измерительный, который служит для усиления сигналов частотой 100 кГц, их детектирования, преобразования в цифровую форму, а также цифровой обработки и вывода на экран ЭЛТ информации в виде частотных характеристик и цифро-знаковых символов.

Принцип действия блока измерительного основан на программном осуществлении всех управляющих и вычислительных операций, совокупность которых обеспечивает получение и представление в графической (на экране ЭЛТ) и цифровой форме информации о разности фаз и отношении амплитуд входных сигналов, а также производных величин, получаемых функциональным преобразованием.

Блок измерительный осуществляет управление работой всего измерителя и выполняет следующие основные операции:

- установку заданной полосы перестройки частот, линейную перестройку частоты в заданной полосе, цифровой отсчет полосы и частоты метки;
- калибровку измерителей по амплитуде и аргументу в установленной полосе частот, запоминание и исключение неравномерностей калибровки;
- вычисление и индикацию измеряемого параметра на экране ЭЛТ в цифровой форме и в виде кривых частотных зависимостей;
- исключение погрешности рассогласования при измерении входных параметров.

Работа блока измерительного основана на пошаговом управлении частотой ГКЧ 4 кодовыми числами, полученными на каждом шаге отклика СВЧ измерительной схемы, оценке уровней сигналов отклика, их нормировании в преобразователе аналого-измерительном и передачи через аналого-цифровой преобразователь в вычислительное устройство для обработки. Обработанная информация в виде частотной зависимости требуемого параметра выводится на экран ЭЛТ с частотой перестройки 50 Гц (при перестройке ГКЧ4 с частотой около 3 Гц), т.е. измеритель работает в псевдореальном масштабе времени. Информация выводится в 512 частотных точках установленной полосы перестройки. Все взаимодействия между генераторной, приемнообрабатывающей и индикационной частями измерителя осуществляются через узел управления по программе, записанной в постоянном запоминающем устройстве, и органы управления дискретного действия передней панели блока измерительного, объединяемые единой магистралью, являющейся упрощенным вариантом линии коллективного пользования.

Режимы работы измерителя Р4-37

В зависимости от схемы соединения СВЧ измерительных узлов возможны следующие режимы измерений:

- **измерения входных параметров** (модуля и аргумента коэффициента отражения, КСВН, составляющих R и X полного сопротивления $Z = R + iX$);
- **измерения проходных параметров** (модуля и аргумента коэффициента передачи, ослабления и ГВЗ);
- **измерения усиления** до 30 дБ;

Измерения и наблюдения частотных зависимостей параметров можно проводить в пределах всей полосы частоты измерителя (1 – 1250 МГц) или в установленной полосе, однако погрешности измерения гарантируются только при измерениях в полосе частот не более 650 МГц.

При измерении фазовых характеристик желательно выбирать такую полосу частот, чтобы измеряемый набег фазы в установленной полосе не превышал 2π , особенно это касается измерений в полярной системе координат.

Калибровку измерителя необходимо производить в декартовой системе координат. Измерения можно производить как в декартовой, так и в полярной системах координат. Переходить в полярную систему рекомендуется в случаях необходимости (например, при измерении и наблюдении полных сопротивлений с использованием круговых диаграмм полных сопротивлений – диаграмм Вольперта-Смита).

При проведении длительных измерений, особенно в широкой полосе частот, перекалибровку измерителя необходимо проводить не реже чем через 15 мин.

Назначение основных органов управления измерителя Р4-37

Принцип действия измерителя Р4-37 основан на программном осуществлении всех управляющих и вычислительных операций, совокупность которых обеспечивает получение и представление в графическом и цифровом виде на экране ЭЛТ информации о частотных зависимостях измеряемых параметров. Управление режимами работы и видом представляемой информации осуществляется с передней панели измерителя с помощью кнопочных переключателей.

Для исключения ошибок в действиях оператора в измерителе введен диалоговый режим.

Процесс подготовки измерителя к измерениям и проведения измерений автоматизирован путем программной реализации следующих алгоритмов:

- подготовки и калибровки измерителя по частоте;
- калибровки измерителя по амплитуде и фазе;
- измерения отдельных параметров и вывода информации на экран ЭЛТ.

После включения тумблера «СЕТЬ» на блоках измеритель Р4-37 считается подготовленным к работе через 15 мин. прогрева.

При нажатии кнопки « $\Delta F_{\max}$ » включается программа линейаризации и калибровки частотного диапазона в пределах всей рабочей полосы частот измерителя Р4-37.

При нажатии кнопки «F1» цифровыми кнопками «0», «1», «2»...«9» набирается нижняя частота требуемой полосы перестройки, аналогично при нажатии кнопки «F2» — верхняя частота. Частоты F1 и F2 индицируются в нижней части экрана ЭЛТ. Программой предусмотрено чтобы значения набираемых частот F1 и F2 не выходили за пределы рабочих частот измерителя, а калибровочные константы запоминаются в 512 точках установленной полосы перестройки.

Ручка «МЕТКА» предназначена для перемещения метки по кривым частотных зависимостей параметров на экране ЭЛТ. Значение частоты и величина измеряемого параметра на частоте метка индицируется в цифровой форме в верхней части экрана ЭЛТ.

Установку метки на требуемую частоту с погрешностью из-за дискретности перестройки частоты возможно производить и программным путем. Для этого необходимо нажать кнопку «F». В нижней части экрана ЭЛТ появится знак «?». С помощью цифровых кнопок выбрать требуемые значения частоты. Нажать кнопку «».

При нажатой кнопке «F» частотная метка не будет управляться ручкой «МЕТКА». Для перехода на другую частоту измерения необходимо вернуть кнопку «F» в исходное положение, затем повторно нажать и повторить цифровой набор новой частоты. Нажать кнопку «».

Кнопки «0», «1», «2»...«9» служат не только для выбора нужной частоты F1 или F2, но и управляют цифровым фазовращателем, измеряющим фазовый сдвиг между опорным и измеряемым сигналами и обеспечивают другие необходимые цифровые управления.

При нажатии кнопок «», «», «», «» будет сдвигаться или меняться наклон фазо-частотной характеристики в зависимости от набранных значений на цифровых кнопках. Изменение наклона фазо-частотной характеристики эквивалентно изменению электрической длины опорного канала измерителя.

Кнопка «» одновременно служит для изменения масштаба по фазе на экране ЭЛТ в декартовой системе координат в 2, 4, 8 раз (увеличивается чувствительность по фазе). При нажатии кнопки один раз увеличивается в 2 раза; два раза — в 4, три раза — в 8 раз. При следующем нажатии чувствительность уменьшается. Если при наборе цифровых значений произошла ошибка, то необходимо нажать кнопку «», которая обеспечивает стирание. Кнопка «» также обеспечивает возврат программы калибровки измерителя в исходное состояние. При нажатии кнопок «K1», «K2» и цифровых кнопок можно устанавливать контрольные уровни для определения допустимости изменения исследуемого параметра.

При нажатии кнопки «» осуществляется запись числовой величины, набранной при помощи цифровых кнопок. При помощи кнопки «», которую необходимо держать нажатой 2 – 3 с, запускаются программы калибровки по

модулю и фазе относительно соответствующего калибровочного эталона (холостого хода — модуль 1 и фаза 0° или короткого замыкания — модуль 1 и фаза 180°). При измерении коэффициентов отражения (нажата кнопка « λ ») калибровка проводится по холостому ходу (ХХ) и короткому замыканию (КЗ), что обеспечит уменьшение погрешности при измерении. Последующее нажатие кнопок « ∇ » и « $\blacksquare$ » возвращает программу калибровки измерителя в исходное состояние.

При сбое процесса калибровки по какой либо причине, появлении на экране записи «ОШИБКА» необходимо нажать ОБЩ « $\times$ » и затем повторить процесс установки полосы перестройки частоты, установления уровня опорного сигнала выравнивания набег по фазе и калибровке.

Выравнивание линий калибровки по фазе и модулю при измерении проходных параметров или окончание процесса усреднения при измерении параметров отражения (погаснет запись — КЗ «?») означает, что калибровка измерителя закончена и можно приступить к измерениям.

При всех измерениях необходимо учитывать, что переключение аттенюатора в опорном канале возможно при нажатых кнопках « dB » и ОН (ПРЕДЕЛЫ «dB»), также предусмотрено автоматическое выключение аттенюатора при измерении ослаблений более 60 дБ в автоматическом режиме, а переключение аттенюаторов в измерительном канале возможно производить как в ручном режиме при нажатых кнопках ИН (ПРЕДЕЛЫ «dB»), так и в автоматическом (кнопка « dB » находится в исходном состоянии — не нажата). В том случае переключение аттенюаторов будет осуществляться программным путем. Так как многие кнопки имеют многоцелевое назначение, то необходимо помнить о строгой последовательности при нажатии кнопок.

После нажатия кнопок « λ », « dB », операций с цифровыми кнопками «0», «1», «2»...«9» необходимо нажатие кнопки « $\blacksquare$ ». При изменении наклона фазой характеристики или смещения кривой в пределах экрана ЭЛТ степенями необходимо набрать нужное численное значение, нажать кнопки « $\blacksquare$ », «0», затем повторно нажать « $\blacksquare$ », «0» и т.д. Перемещение будет осуществляться с заданным шагом.

Кнопки («R», «X», « $|\Gamma|$ », КСВН, « $\hat{O}$ », « A_X », ГВЗ) коммутируют программы вычислений и вывода на экран ЭЛТ значений обозначенных параметров. Исходными при вычислении является модуль $|\Gamma|$ и аргумент φ измеряемого коэффициента отражения (или передачи).

Остальные параметры вычисляются в соответствии со следующими выражениями:

— активная R и реактивная X составляющие полного нормированного сопротивления $Z = R + iX$

$$Z = R + iX = \frac{1 + |\Gamma| \exp(i\varphi)}{1 - |\Gamma| \exp(i\varphi)}; \quad (1.1)$$

— КСВН

$$K_{\text{сò.у}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}; \quad (1.2)$$

— ослабление A , дБ

$$A = 20 \lg(|\Gamma|); \quad (1.3)$$

— ГВЗ

$$\tau_0 = \frac{d\varphi}{d\omega} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(f)}{df}, \quad (1.4)$$

где $\varphi(f)$ — измеряемая частотная зависимость аргумента коэффициента отражения (передачи).

При нажатии упомянутых кнопок (за исключение кнопки **ГВЗ**) на экране ЭЛТ будут индцироваться кривые модуля $|\Gamma|$ и аргумента φ коэффициента отражения (передачи), а при нажатии кнопки **ГВЗ** — модуля $|\Gamma|$ и ГВЗ. Значения параметров (R , X , КСВН, A , $|\Gamma|$, φ , ГВЗ) на частоте метки индцируются в цифровой форме в верхней части экрана ЭЛТ.

Для удобства измерения отдельных параметров предусмотрены следующие режимы индикации измеряемых величин:

— линейный масштаб по модулю и фазе в декартовых координатах (кнопка «□» в исходном положении);

— логарифмический масштаб по амплитуде для наблюдения амплитудно-частотных зависимостей с большим перепадом по ослаблению (кнопка «□» в исходном положении и нажата кнопка «lg»);

— линейный масштаб по амплитуде и фазе в полярных координатах $|\Gamma|$ и φ для наблюдения частотных зависимостей R и X по круговым диаграммам полных сопротивлений, имеющимся в комплекте измерителя (нажата кнопка «○», кнопка «lg» в исходном положении).

Смена режимов индикации не требует перекалибровки измерителя.

Под обрамлением ЭЛТ находятся резисторы регулировки яркости «*», фокуса «⊙ 1», «⊙ 2», смещения по вертикали «↓» и горизонтали «↔», при помощи которых перед измерениями установить удобные для наблюдения яркость и фокус луча.

Если требуется измерить неидентичность двух устройств, то необходимо произвести калибровку измерителя в режиме измерения входных или проходных параметров в зависимости от объекта измерения, затем подключить эталонное устройство и одновременно индцировать кривые модуля и аргумента (кнопки «Ф» и «|S|» (КАНАЛЫ) нажаты). Нажмите кнопки «П» и «Х-П» или «Х/П» в зависимости от того, какую кривую (аргумента или модуля) необходи-

мо запомнить. На экране ЭЛТ должна остаться кривая аргумента или модуля эталонного устройства. Отключите эталонное устройство и подключите измеряемый объект. На экране будут индцироваться кривые эталонного и измеряемого устройств. Нажмите кнопку «Ф» (ВИД ИЗМЕР.) при нажатой кнопке «Х-П» и, перемещая частотную метку, определите разность фаз между измеряемым и эталонным устройствами. Аналогично, при нажатой кнопке «Х/П» нажмите кнопку «А_х» и произведите сравнение амплитудных характеристик в децибелах.

Технические данные измерителя Р4-37

1) Рабочие условия эксплуатации:

- температура окружающего воздуха от 5 до 40°C;
- относительная влажность воздуха не более 80% при температуре 25°C;
- напряжение питающей сети 220 ± 22 В, частотой $50 \pm 0,4$ Гц.

Примечание. Не допускается подвергать измерители воздействию циклических изменений температур.

2) Рабочий диапазон частот измерителя от 1 до 1250 МГц. Допускается одна «пораженная» точка на частоте (1090 ± 3) МГц.

3) Пределы допускаемого значения основной абсолютной погрешности измерения частоты измерителя Δf в полосе частот не более 650 МГц на частотах $f < 31$ МГц составляют ± 20 кГц, а при $f > 31$ МГц устанавливаются согласно значениям, определяемым в МГц по формуле:

$$\Delta f = \pm(0,1 + 0,001 f),$$

где f — значение измеряемой частоты, МГц.

4) Неравномерность уровня калибровки в режиме измерения КСВН и аргумента коэффициента отражения в полосе частот не более 650 МГц составляет:

- не более 0,5 дБ по амплитуде;
- не более 5° по фазе.

5) Диапазоны:

- индикации КСВН от 1 до ∞ ;
- измерения КСВН от 1,03 до 2,0;
- измерения модуля коэффициента отражения от 0,02 до 1;
- измерения аргумента коэффициента отражения от 0 до $\pm 180^\circ \cdot n$ при КСВН входа от 1,2 до 2,0, где n — число целых перепадов набега фазы в измеряемой полосе, $n \leq 10$.

Примечание. Вместо знака «∞» на экране может высвечиваться любое трехзначное число C , $|C| \geq 100$.

6) Пределы допускаемого значения основной относительной погрешности измерения КСВН $\delta K_{C0.U}$ и модуля коэффициента отражения $\delta \Gamma_x$ при калибровке в полосе частот не более 650 МГц устанавливаются согласно значениям, определяемым в процентах по формулам:

$$\delta K_{C0.U} = \pm 2,4 K_{C0.U} \text{ при } 1,03 \leq K_{C0.U} \leq 2,0;$$

$$\delta \Gamma_x = \pm (1 + 5|\Gamma_x| + 1,2/|\Gamma_x|) \text{ при } 0,02 \leq |\Gamma_x| \leq 1,0,$$

где $K_{C0.U}$ — значение измеряемого КСВН; $|\Gamma_x|$ — значение измеряемого коэффициента отражения.

7) Пределы допускаемого значения относительной погрешности измерения КСВН $\delta K'_{C0.U}$ и модуля коэффициента отражения $\delta \Gamma'_x$ при калибровке в полосе частот не более 650 МГц при воздействии влияющих факторов устанавливаются согласно значениям, определяемым в процентах по формулам:

$$\delta K'_{C0.U} = \pm (2,4 K_{C0.U} + 2) \text{ при } 1,03 \leq K_{C0.U} \leq 2,0;$$

$$\delta \Gamma'_x = \pm (4 + 5|\Gamma_x| + 1,2/|\Gamma_x|) \text{ при } 0,02 \leq |\Gamma_x| \leq 1,0,$$

где $K_{C0.U}$ — значение измеряемого КСВН; $|\Gamma_x|$ — значение измеряемого коэффициента отражения.

8) Пределы допускаемого значения основной абсолютной погрешности измерения аргумента коэффициента отражения $\Delta \phi \Gamma_x$ при калибровке в полосе частот не более 650 МГц устанавливаются согласно значениям, определяемым в градусах по формулам:

$$\Delta \phi \Gamma_x = \pm (3 + 4/K_{C0.U}) \text{ при } 1,2 \leq K_{C0.U} \leq 2,0;$$

$$\Delta \phi \Gamma_x = \pm (1,5 + |\Gamma_x| + 0,5/|\Gamma_x|) \text{ при } 0,05 \leq |\Gamma_x| \leq 1,0,$$

где $K_{C0.U}$ — значение измеряемого КСВН; $|\Gamma_x|$ — значение измеряемого коэффициента отражения.

9) Пределы допускаемого значения абсолютной погрешности измерения аргумента коэффициента отражения $\Delta \phi \Gamma'_x$ при калибровке в полосе частот не более 650 МГц при воздействии влияющих факторов устанавливаются согласно значениям, определяемым в градусах по формулам:

$$\Delta \phi \Gamma'_x = \pm (5 + 4/K_{C0.U}) \text{ при } 1,2 \leq K_{C0.U} \leq 2,0;$$

$$\Delta \phi \Gamma'_x = \pm (4,5 + |\Gamma_x| + 0,5/|\Gamma_x|) \text{ при } 0,05 \leq |\Gamma_x| \leq 1,0,$$

где $K_{\text{C0.U}}$ — значение измеряемого КСВН; $|\Gamma_x|$ — значение измеряемого коэффициента отражения.

10) Диапазон измерения модуля коэффициента передачи при калибровке в полосе частот не более 650 МГц

от +35 до –80 дБ.

11) Диапазон измерения аргумента коэффициента передачи в декартовой системе координат при коэффициенте передачи от +35 до –60 дБ

от 0 до $\pm 180^\circ \cdot n$,

где n — число целых перепадов набег фазы в измеряемой полосе, $n \leq 10$.

12) Пределы допускаемого значения основной абсолютной погрешности измерения модуля коэффициента передачи ΔA_x при калибровке в полосе частот не более 650 МГц устанавливаются согласно значениям, определяемым в децибелах по формуле

$$\Delta A_x = \pm(0,01|A_x| + 0,3),$$

где A_x — значение измеряемого модуля коэффициента передачи при КСВН входа и выхода устройств не более 1,3 дБ.

13) Пределы допускаемого значения абсолютной погрешности измерения модуля коэффициента передачи $\Delta A'_x$ при калибровке в полосе частот не более 650 МГц при воздействии влияющих факторов устанавливаются согласно значениям, определяемым в децибелах по формуле

$$\Delta A_x = \pm(0,015|A_x| + 0,4),$$

где A_x — значение измеряемого модуля коэффициента передачи при КСВН входа и выхода устройств не более 1,3 дБ.

14) Пределы допускаемого значения дополнительной абсолютной погрешности измерения модуля коэффициента передачи ΔA при КСВН входа и выхода устройств более 1,3 устанавливаются согласно значениям, определяемым в децибелах по формуле

$$\Delta A = \pm 10 \sqrt{|S_{11}\Gamma_1|^2 + |S_{22}\Gamma_2|^2 + |\Gamma_1\Gamma_2|^2 |S_{11}S_{22}|^2},$$

где Γ_1 и Γ_2 — коэффициенты отражения выхода тройника и входа аттенюатора 6 дБ, нагруженного на смеситель измерительного канала, не превышающие величин $|\Gamma_1| \leq 0,1$ и $|\Gamma_2| \leq 0,1$; S_{11} , S_{22} — элементы матрицы рассеяния измеряемого устройства.

15) Пределы допускаемого значения основной абсолютной погрешности измерения аргумента коэффициента передачи $\Delta\varphi A_x$ при калибровке в полосе частот не более 650 МГц (при измерении A_x от +30 до –60 дБ) устанавливаются согласно значениям, определяемым в градусах по формуле

$$\Delta\varphi A_x = \pm(2 + 0,05|A_x|),$$

где A_x — значение измеряемого модуля коэффициента передачи при КСВН входа и выхода устройств не более 1,3 дБ.

16) Пределы допускаемого значения абсолютной погрешности измерения аргумента коэффициента передачи $\Delta\varphi A'_x$ при калибровке в полосе частот не более 650 МГц при воздействии влияющих факторов устанавливаются согласно значениям, определяемым в градусах по формуле

$$\Delta\varphi A'_x = \pm(3 + 0,05|A_x|),$$

где A_x — значение измеряемого модуля коэффициента передачи при КСВН входа и выхода устройств не более 1,3 дБ.

17) Пределы допускаемого значения дополнительной абсолютной погрешности измерения аргумента коэффициента передачи $\Delta\varphi$ при КСВН входа и выхода устройств более 1,3 устанавливаются согласно значениям, определяемым в градусах по формуле

$$\Delta\varphi = \pm 100 \sqrt{|S_{11}\Gamma_1|^2 + |S_{22}\Gamma_2|^2 + |\Gamma_1\Gamma_2|^2 |S_{11}S_{22}|^2},$$

где Γ_1 и Γ_2 — коэффициенты отражения выхода тройника и входа аттенюатора 6 дБ, нагруженного на смеситель измерительного канала, не превышающие величин $|\Gamma_1| \leq 0,1$ и $|\Gamma_2| \leq 0,1$; S_{11} , S_{22} — элементы матрицы рассеяния измеряемого устройства.

18) Диапазон измерения группового времени задержки (ГВЗ)

$$- \text{от } 0 \text{ до } 10^4/F \text{ нс,}$$

где F , МГц — полоса частот, в которой производится индикация ГВЗ на экране ЭЛТ;

$$F \geq 10 \text{ МГц} \quad \text{при } f_{\text{а}} \leq 31 \text{ МГц} \text{ и } F \geq 50 \text{ МГц} \quad \text{при } f_{\text{а}} \geq 31 \text{ МГц}.$$

19) Пределы допускаемого значения основной абсолютной погрешности измерения ГВЗ $\Delta\tau$ в полосе частот от $0,02F$ до $0,96F$ при измерении A_x от 0 до –60 дБ устанавливаются согласно значениям, определяемым в наносекундах по формуле

$$\Delta\tau = \pm(0,03|A_x| + 300/F),$$

где A_x , дБ — значение измеряемого модуля коэффициента передачи при КСВН входа и выхода устройств не более 1,3; F , МГц — полоса частот, в которой производится индикация ГВЗ на экране ЭЛТ.

20) Пределы допускаемого значения абсолютной погрешности измерения ГВЗ $\Delta\tau'$ при измерении A_x от 0 до –60 дБ при воздействии влияющих факторов устанавливаются согласно значениям, определяемым в наносекундах по формуле

$$\Delta\tau = \pm(0,03|A_x| + 400/F),$$

где A_x , дБ — значение измеряемого модуля коэффициента передачи при КСВН входа и выхода устройств не более 1,3; F , МГц — полоса частот, в которой производится индикация ГВЗ на экране ЭЛТ.

21) Измеритель обеспечивает свои технические характеристики в пределах норм, установленных техническими условиями, по истечении времени установления рабочего режима, равного

– 15 мин.

22) Нестабильность уровня калибровки измерителя после 15-минутного прогрева за 15 мин в нормальных условиях:

- не более $\pm 0,2$ дБ по модулю;
- не более $\pm 1^\circ$ по фазе.

23) Уровень мощности на входе измеряемого устройства во всех режимах измерения за исключением измерения ослабления от 40 до 80 дБ

– не более 10^{-6} Вт.

24) Мощность, потребляемая измерителем от сети при номинальном напряжении,

– не превышает 480 ВА.

25) Волновое сопротивление измерительного тракта 50 Ом и 75 Ом (соединители — тип III, вариант 1; тип II и тип VIII по ГОСТ 13317-80 соответственно).

26) Измеритель допускает непрерывную работу в рабочих условиях в течение времени не менее 8 ч. при сохранении своих технических характеристик в пределах норм.

27) Нарботка на отказ не менее 3000 ч.

28) Габаритные размеры и масса:

– ГКЧ4: не более 488 x 495 x 93 мм, 17 кг;

- блок измерительный: не более 488 х 536 х 253 мм, 28 кг;
- преобразователь частоты: 488 х 495 х 93, 12 кг;
- комплекты комбинированные: 483 х 375 х 170, 14 и 15 кг.

1.4 Ключевые вопросы для допуска к лабораторным работам

- 1) Сформулируйте назначение векторного измерителя Р4-37. Поясните измеряемые параметры.
- 2) Назовите блоки векторного измерителя Р4-37. Поясните их назначение.
- 3) Назовите и поясните режимы работы векторного измерителя Р4-37.
- 4) Сформулируйте рабочие условия эксплуатации векторного измерителя Р4-37.
- 5) Какой рабочий диапазон векторного измерителя Р4-37 и какая погрешность определения частоты, от чего она зависит?
- 6) Назовите и поясните диапазоны индикации и измерения КСВН, модуля и аргумента коэффициента отражения.
- 7) Какая погрешность измерения КСВН в рабочих условиях эксплуатации векторного измерителя Р4-37 без воздействия и при воздействии влияющих факторов, от чего она зависит? Поясните причины их отличия.
- 8) Какая погрешность измерения модуля коэффициента отражения в рабочих условиях эксплуатации векторного измерителя Р4-37 без воздействия и при воздействии влияющих факторов, от чего она зависит? Поясните причины их отличия.
- 9) Какая погрешность измерения аргумента коэффициента отражения в рабочих условиях эксплуатации векторного измерителя Р4-37 без воздействия и при воздействии влияющих факторов, от чего она зависит? Поясните причины их отличия.
- 10) Назовите и поясните диапазоны измерения модуля коэффициента передачи (ослабления) и аргумента коэффициента передачи.
- 11) Какая погрешность измерения модуля коэффициента передачи в рабочих условиях эксплуатации векторного измерителя Р4-37 без воздействия и при воздействии влияющих факторов, от чего она зависит? Поясните причины их отличия.
- 12) Как определяется дополнительная погрешность измерения модуля коэффициента передачи при КСВН входа и выхода измеряемого устройства более 1,3, от чего она зависит?

13) Какая погрешность измерения аргумента коэффициента передачи в рабочих условиях эксплуатации векторного измерителя Р4-37 без воздействия и при воздействии влияющих факторов, от чего она зависит? Поясните причины их отличия.

14) Как определяется дополнительная погрешность измерения аргумента коэффициента передачи при КСВН входа и выхода измеряемого устройства более 1,3, от чего она зависит?

15) Назовите и поясните диапазон измерения группового времени задержки.

16) Какая погрешность измерения группового времени задержки в рабочих условиях эксплуатации векторного измерителя Р4-37 без воздействия и при воздействии влияющих факторов, от чего она зависит? Поясните причины их отличия.

17) Назовите значения волнового сопротивления микроволнового тракта векторного измерителя Р4-37.

1.5 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) Титульный лист установленного образца (см. Приложение В) .
- 2) Цель работы.
- 3) Задание на домашнее исследование и их результаты.
- 4) Задание на лабораторные исследования.
- 5) Результаты лабораторных исследований.
- 6) Выводы.

Выводы по работе должны включать как констатируемую часть, отражающую основные полученные результаты, так и аналитическую, в которой проводится сравнительный анализ данных теоретического и экспериментального исследований, а также объяснение полученных результатов.

2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

«Измерение КСВН, модуля и аргумента коэффициента отражения»

2.1 Домашнее задание

1) Изучите теоретические положения (ключевые положения), используя методические указания, конспект лекций и рекомендованную литературу.

2) **Решите задачу.** В результате проведенных измерений параметров СВЧ устройства (коаксиального аттенюатора) при помощи векторного измерителя Р4-37 на частоте f получены соответствующие значения КСВН, модуля $|\Gamma|$ и аргумента φ коэффициента отражения. Измерения проводились в рабочих условиях эксплуатации без воздействия влияющих факторов.

Рассчитайте значения относительной погрешности измерения всех полученных параметров, если их числовые значения равны:

$$f = 210 + 20 \cdot (n + m), \text{ МГц}; \quad K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}} = 1,2 + 0,01 \cdot (n - m),$$

$$|\Gamma| = \frac{0,2 + 0,01 \cdot (n - m)}{2,2 + 0,01 \cdot (n - m)}; \quad \varphi = \pi + 0,1 \cdot \pi \cdot n - 0,1 \cdot \pi \cdot m \text{ рад},$$

где n, m – последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки соответственно.

Пример выбора исходных данных. Пусть последние цифры номера зачетной книжки 83, тогда $m = 8$, $n = 3$ и соответственно численные значения всех полученных параметров:

$$f = 210 + 20 \cdot (3 + 8) = 430 \text{ МГц}; \quad K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}} = 1,2 + 0,01 \cdot (3 - 8) = 1,15.$$

$$|\Gamma| = \frac{0,2 + 0,01 \cdot (3 - 8)}{2,2 + 0,01 \cdot (3 - 8)} = 0,07; \quad \varphi = \pi + 0,1 \cdot \pi \cdot 3 - 0,1 \cdot \pi \cdot 8 = 0,5\pi \text{ рад}.$$

Методические указания к решению домашней задачи. Для расчета значений относительной погрешности измерения всех полученных параметров можно воспользоваться формулами соответствующих пунктов $\Delta f - 3)$, $\delta K_{\text{C}\ddot{\text{O}}.\text{U}}$ и $\delta \Gamma_x - 6)$, $\Delta \varphi \Gamma_x - 8)$ (см. Технические данные измерителя Р4-37).

3) Подготовьте ответы на ключевые вопросы (вопросы для допуска и к защите лабораторной работе).

4) Изучите инструкцию по эксплуатации векторного измерителя Р4-37 (см. Приложение А, А.1, А.3.1 и А.3.2).

5) Подготовьте бланк отчета по лабораторной работе, который включает

титульный лист установленного образца (см. Приложение В), цель работы (см. 1.1), решение задачи, структурную схему векторного измерителя Р4-37 для измерения входных параметров (см. Приложение А, рис. А.1).

2.2 Лабораторное задание

1) Подготовьте векторный измеритель Р4-37 к измерению входных параметров (см. Приложение А, А.1).

2) Зафиксируйте значение минимального уровня напряжения опорного канала.

3) Выполните измерения КСВН, модуля и аргумента коэффициента отражения входа СВЧ устройства (см. Приложение А, А.3.1, А3.2) на частоте

$$f = 210 + 20 \cdot (n + m), \text{ МГц,}$$

где n, m – последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки соответственно.

Исследуемое СВЧ устройство выдается преподавателем, который проводит лабораторное занятие.

2.3 Вопросы к защите лабораторной работы

1) Назовите и поясните основные этапы подготовки векторного измерителя Р4-37 к измерению входных параметров. Какой минимальный уровень напряжения опорного канала?

2) Поясните структурную схему векторного измерителя Р4-37 для измерения входных параметров, особенности включения рефлектометра.

3) Как проводятся измерения КСВН при помощи векторного измерителя Р4-37?

4) Как проводятся измерения модуля и аргумента коэффициента отражения при помощи векторного измерителя Р4-37?

5) Как взаимосвязаны модуль коэффициента отражения и КСВН?

6) Как определяется и от чего зависит погрешность измерения частоты?

7) Как определяется и от чего зависит погрешность измерения КСВН?

8) Как определяется и от чего зависит погрешность измерения модуля коэффициента отражения?

9) Как определяется и от чего зависит погрешность измерения аргумента коэффициента отражения?

3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

«Измерение модуля и аргумента коэффициента передачи»

3.1 Домашнее задание

1) Изучите теоретические положения (ключевые положения), используя методические указания, конспект лекций и рекомендованную литературу.

2) **Решите задачу.** В результате проведенных измерений параметров СВЧ устройства (коаксиального аттенюатора) при помощи векторного измерителя Р4-37 на частоте f получены соответствующие значения ослабления (модуля коэффициента передачи) A_x и фазы коэффициента передачи φ . Измерения проводились в рабочих условиях эксплуатации без воздействия влияющих факторов при КСВН входа и выхода СВЧ устройства не более 1,3 дБ.

Рассчитайте значения относительной погрешности измерения всех полученных параметров:

$$A_x = 20 + n - m, \text{ дБ}; \quad \varphi = 90 - 5 \cdot m, \text{ град.}$$

где n, m — последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки соответственно.

Пример выбора исходных данных. Пусть последние цифры номера зачетной книжки 83, тогда $m = 8$, $n = 3$ и соответственно числовые значения всех полученных параметров:

$$A_x = 20 + 3 - 8 = 15 \text{ дБ}; \quad \varphi = 90 - 5 \cdot 8 = 50 \text{ град.}$$

Методические указания к решению домашней задачи. Для расчета значений относительной погрешности измерения всех полученных параметров можно воспользоваться формулами соответствующих пунктов $\Delta A_x - 12)$, $\Delta \varphi A_x - 15)$ (см. Технические данные измерителя Р4-37).

3) Подготовьте ответы на ключевые вопросы (вопросы для допуска и к защите лабораторной работе).

4) Изучите инструкцию по эксплуатации векторного измерителя Р4-37 (см. Приложение А, А.2, А.4.1 – А.4.3).

5) Подготовьте бланк отчета по лабораторной работе, который включает титульный лист установленного образца (см. Приложение В), цель работы (см. 1.1), решение задачи, структурную схему векторного измерителя Р4-37 для измерения проходных параметров (см. Приложение А, рис. А.2).

3.2 Лабораторное задание

1) Подготовьте векторный измеритель Р4-37 к измерению проходных параметров (см. Приложение А, А.2).

2) Зафиксируйте значение минимального уровня напряжения опорного канала.

3) Выполните измерения модуля и аргумента коэффициента передачи входа СВЧ устройства (см. Приложение А, А.4.1) на частоте

$$f = 210 + 20 \cdot (n + m), \text{ МГц,}$$

где n, m – последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки соответственно.

Исследуемое СВЧ устройство выдается преподавателем, который проводит лабораторное занятие.

3.3 Вопросы к защите лабораторной работы

1) Назовите и поясните основные этапы подготовки векторного измерителя Р4-37 к измерению проходных параметров. Какой минимальный уровень напряжения опорного канала?

2) Поясните структурную схему векторного измерителя Р4-37 для измерения проходных параметров, особенности включения измерительных СВЧ узлов.

3) Как проводятся измерения ослабления от +10 до –40 дБ и аргумента коэффициента передачи при помощи векторного измерителя Р4-37?

4) Как проводятся измерения ослаблений свыше –40 дБ при помощи векторного измерителя Р4-37?

5) Как проводятся измерения усиления до +30 дБ при помощи векторного измерителя Р4-37?

6) Как определяется и от чего зависит погрешность измерения модуля коэффициента передачи ?

7) Как определяется и от чего зависит погрешность измерения аргумента коэффициента передачи ?

4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

«Измерение полных сопротивлений»

4.1 Домашнее задание

1) Изучите теоретические положения (ключевые положения), используя методические указания, конспект лекций и рекомендованную литературу.

2) **Решите задачу.** В результате проведенных измерений параметров СВЧ устройства (коаксиального аттенюатора) при помощи векторного измерителя Р4-37 на частоте f получены соответствующие значения модуля и аргумента коэффициента отражения. Измерения проводились в рабочих условиях эксплуатации без воздействия влияющих факторов.

Рассчитайте значения нормированного входного сопротивления $Z = R + iX$ СВЧ устройства и относительные погрешности измерения составляющих входного сопротивления δR и δX , если их числовые значения модуля $|\Gamma|$ и аргумента φ коэффициента отражения соответственно равны:

$$|\Gamma| = 0,01 + 0,05 \cdot (n + m); \quad \varphi = \pi + 0,1 \cdot \pi \cdot n - 0,1 \cdot \pi \cdot m \text{ рад},$$

где n, m – последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки соответственно.

Пример выбора исходных данных. Пусть последние цифры номера зачетной книжки 83, тогда $m = 8$, $n = 3$ и соответственно числовые значения всех полученных параметров:

$$|\Gamma| = 0,01 + 0,05 \cdot (3 + 8) = 0,56; \quad \varphi = \pi + 0,1 \cdot \pi \cdot 3 - 0,1 \cdot \pi \cdot 8 = 0,5\pi \text{ рад}.$$

Методические указания к решению домашней задачи. Для расчета значения нормированного входного сопротивления $Z = R + iX$ СВЧ устройства можно воспользоваться (1.1) или после преобразований (1.1) следующим выражением

$$\begin{aligned} Z = R + iX &= \frac{1 + |\Gamma| \exp(i\varphi)}{1 - |\Gamma| \exp(i\varphi)} = \\ &= \frac{1 + |\Gamma|^2}{1 - 2|\Gamma| \cos(\varphi) + |\Gamma|^2} + i \frac{2|\Gamma| \sin(\varphi)}{1 - 2|\Gamma| \cos(\varphi) + |\Gamma|^2}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Для расчета значений относительных погрешностей измерения составляющих входного сопротивления δR и δX можно воспользоваться выражениями:

$$\delta R = \pm |\operatorname{Re}(\delta Z)|; \quad \delta X = \pm |\operatorname{Im}(\delta Z)|, \quad (4.2)$$

где

$$\delta Z = \frac{0,04 + 0,2|\Gamma|^2}{\left[1 - |\Gamma|^2 \exp(i2\varphi)\right] \exp(-i(\varphi + \pi/4))}. \quad (4.3)$$

3) Изучите особенности использования диаграммы Вольперта-Смита (см. Приложение Б).

4) Подготовьте ответы на ключевые вопросы (вопросы для допуска и к защите лабораторной работе).

5) Изучите инструкцию по эксплуатации векторного измерителя Р4-37 (см. Приложение А, А1, А3.3).

6) Подготовьте бланк отчета по лабораторной работе, который включает титульный лист установленного образца (см. Приложение В), цель работы (см. 1.1), решение задачи, структурную схему векторного измерителя Р4-37 для измерения входных параметров (см. Приложение А, рис. А.1).

4.2 Лабораторное задание

1) Подготовьте векторный измеритель Р4-37 к измерению входных параметров (см. Приложение А, А.1).

2) Зафиксируйте значение минимального уровня напряжения опорного канала.

3) Выполните измерения составляющих R и X нормированного входного сопротивления СВЧ устройства (см. Приложение А, А.3.3) на частоте

$$f = 210 + 20 \cdot (n + m), \text{ МГц},$$

где n, m – последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки соответственно.

Исследуемое СВЧ устройство выдается преподавателем, который проводит лабораторное занятие.

4) Определите значение входного сопротивления СВЧ устройства с учетом волнового сопротивления измерительного тракта (см. Приложение Б).

4.3 Вопросы к защите лабораторной работы

1) Назовите и поясните основные этапы подготовки векторного измерителя Р4-37 к измерению входных параметров. Какой минимальный уровень напряжения опорного канала?

2) Поясните структурную схему векторного измерителя Р4-37 для измерения входных параметров, особенности включения рефлектометра.

3) Как проводятся измерения полного сопротивления при помощи векторного измерителя Р4-37?

4) Что такое диаграмма Вольперта-Смита? Поясните ее основные оси.

5) Как по показанию на диаграмме Вольперта-Смита определить полное сопротивление?

6) Вычислите полное сопротивление линии передачи с волновым сопротивлением $Z_{\text{в}} = 50 \text{ Ом}$ отмеченное на диаграмме Вольперта-Смита соответствующей точкой. Местоположение точки на диаграмме Вольперта-Смита задается преподавателем.

7) Выведите формулу (4.1).

8) Выведите формулы (4.2) и (4.3).

5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

«Измерение ГВЗ отраженной волны»

5.1 Домашнее задание

1) Изучите теоретические положения (ключевые положения), используя методические указания, конспект лекций и рекомендованную литературу.

2) **Решите задачу.** В результате проведенных измерений параметров СВЧ устройства (коаксиального аттенюатора) при помощи векторного измерителя Р4-37 на частоте f получены соответствующие значения группового времени задержки (ГВЗ) отраженной волны τ_0 и модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$. Измерения проводились в полосе частот F в рабочих условиях эксплуатации без воздействия влияющих факторов.

Рассчитайте значения относительной погрешности измерения ГВЗ отраженной волны, если числовые значения измеренных параметров равны:

$$\tau_0 = 40 + n - m, \text{ нс}; \quad |\Gamma| = 0,01 + 0,05 \cdot (n + m);$$

$$F = 100 + n - m, \text{ МГц},$$

где n, m – последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки соответственно.

Пример выбора исходных данных. Пусть последние цифры номера зачетной книжки 83, тогда $m = 8$, $n = 3$ и соответственно числовые значения всех полученных параметров:

$$\tau_0 = 40 + 3 - 8 = 35, \text{ нс}; \quad |\Gamma| = 0,01 + 0,05 \cdot (3 + 8) = 0,56;$$

$$F = 100 + 3 - 8 = 95, \text{ МГц}.$$

Методические указания к решению домашней задачи. Для расчета значения относительной погрешности измерения ГВЗ отраженной волны можно воспользоваться формулой

$$\delta\tau_0 = \pm \sqrt{\delta\tau_1^2 + \delta\tau_2^2 + \delta\tau_3^2} \cdot 100, \%, \quad (5.1)$$

где $\delta\tau_1 = \Delta\tau/\tau_0$ – методическая погрешность; τ_0 – измеренное значение ГВЗ, нс; $\Delta\tau = 0,02/F$ – чувствительность измерителя по ГВЗ, нс; F – полоса частот, в которой проведено измерение, ГГц; $\delta\tau_2 = 0,07|\Gamma|$ – погрешность из-за рассогласования; $\delta\tau_3 = 0,03$ – аппаратная погрешность, погрешность преобразования фазочастотной характеристики в ГВЗ.

После преобразований (5.1) можно представить в виде:

$$\delta\tau_0 = \pm \sqrt{0,0004/(F\tau_0)^2 + 0,0049|\Gamma|^2 + 0,0009} \cdot 100, \%, \quad (5.2)$$

где F , ГГц; τ_0 , нс.

3) Подготовьте ответы на ключевые вопросы (вопросы для допуска и к защите лабораторной работе).

4) Изучите инструкцию по эксплуатации векторного измерителя Р4-37 (см. Приложение А, А1, А3.4).

5) Подготовьте бланк отчета по лабораторной работе, который включает титульный лист установленного образца (см. Приложение В), цель работы (см. 1.1), решение задачи, структурную схему векторного измерителя Р4-37 для измерения входных параметров (см. Приложение А, рис. А.1).

5.2 Лабораторное задание

1) Подготовьте векторный измеритель Р4-37 к измерению входных параметров (см. Приложение А, А.1) в диапазоне

$$F = f_{\text{н}} - f_{\text{в}},$$

где $f_{\text{в}} = f - F/2$, МГц; $f_{\text{н}} = f + F/2$, МГц;

$F = 100 + n - m$, МГц, $f = 210 + 20 \cdot (n + m)$, МГц; n, m — последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки соответственно.

2) Зафиксируйте значение минимального уровня напряжения опорного канала.

3) Выполните измерения ГВЗ отраженной волны СВЧ устройства (см. Приложение А, А.3.4) на частоте

$$f = 210 + 20 \cdot (n + m), \text{ МГц},$$

где n, m — последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки соответственно.

Исследуемое СВЧ устройство выдается преподавателем, который проводит лабораторное занятие.

5.3 Вопросы к защите лабораторной работы

- 1) Назовите и поясните основные этапы подготовки векторного измерителя Р4-37 к измерению входных параметров. Какой минимальный уровень напряжения опорного канала?
- 2) Поясните структурную схему векторного измерителя Р4-37 для измерения входных параметров, особенности включения рефлектометра.
- 3) Как проводятся измерения ГВЗ отраженной волны при помощи векторного измерителя Р4-37?
- 4) Как определяется и от чего зависит погрешность измерения ГВЗ отраженной волны?

6 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «Измерение ГВЗ четырехполюсников»

6.1 Домашнее задание

1) Изучите теоретические положения (ключевые положения), используя методические указания, конспект лекций и рекомендованную литературу.

2) **Решите задачу.** В результате проведенных измерений параметров СВЧ устройства (коаксиального аттенюатора) при помощи векторного измерителя Р4-37 на частоте f получены соответствующие значения группового времени задержки (ГВЗ) СВЧ устройства $\tau_{i\ddot{a}\delta}$ и ослабления (модуля коэффициента передачи) $A_{i\ddot{a}\delta}$. Измерения проводились в полосе частот F в рабочих условиях эксплуатации без воздействия влияющих факторов.

Рассчитайте значения погрешности измерения ГВЗ СВЧ устройства, если числовые значения измеренных параметров равны:

$$\tau_{i\ddot{a}\delta} = 40 + n - m, \text{ нс}; \quad A_{i\ddot{a}\delta} = 20 + n - m, \text{ дБ};$$

$$F = 100 + n - m, \text{ МГц};$$

$$|\Gamma_{11}| = 0,1 + 0,005 \cdot (n + m); \quad |\Gamma_{22}| = 0,19 - 0,005 \cdot (n + m);$$

$$\tau_{0_{11}} = 60 + n - m, \text{ нс}; \quad \tau_{0_{22}} = 60 + m - n, \text{ нс},$$

где n, m – последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки соответственно; $|\Gamma_{11}|$, $\tau_{0_{11}}$ – модуль коэффициента отражения и ГВЗ отраженной волны измеряемого четырехполюсника со стороны входа соответственно; $|\Gamma_{22}|$, $\tau_{0_{22}}$ – модуль коэффициента отражения и ГВЗ отраженной волны измеряемого четырехполюсника со стороны выхода соответственно.

Пример выбора исходных данных. Пусть последние цифры номера зачетной книжки 83, тогда $m = 8$, $n = 3$ и соответственно числовые значения всех полученных параметров:

$$\tau_{i\ddot{a}\delta} = 40 + 3 - 8 = 35, \text{ нс}; \quad A_{i\ddot{a}\delta} = 20 + 3 - 8 = 15, \text{ дБ};$$

$$F = 100 + 3 - 8 = 95, \text{ МГц};$$

$$|\Gamma_{11}| = 0,01 + 0,005 \cdot (3 + 8) = 0,155; \quad |\Gamma_{22}| = 0,19 - 0,005 \cdot (3 + 8) = 0,135;$$

$$\tau_{0_{11}} = 60 + 3 - 8 = 55, \text{ нс}; \quad \tau_{0_{22}} = 60 + 8 - 3 = 65, \text{ нс}.$$

Методические указания к решению домашней задачи. Для расчета значения основной абсолютной погрешности измерения ГВЗ четырехполюсника

при измерении $A_{\text{ia}\delta}$ от 0 до –60 дБ и КСВН входа и выхода устройства не более 1,3, можно воспользоваться формулой пункта $\Delta\tau$ – 19) (см. Технические данные измерителя Р4-37).

При КСВН входа и выхода устройства более 1,3, которое может быть определено на основании формулы (1.2), дополнительная погрешность от рас- согласования приближенно равна

$$\delta\tau_{\text{ia}\delta} = \pm \frac{0,1}{\tau_{\text{ia}\delta}} \sqrt{(|\Gamma_{11}| \tau_{0_{11}})^2 + (|\Gamma_{22}| \tau_{0_{22}})^2} \cdot 100, \% \quad (6.1)$$

где $\tau_{\text{ia}\delta}$, нс — измеряемое ГВЗ.

3) Подготовьте ответы на ключевые вопросы (вопросы для допуска и к защите лабораторной работе).

4) Изучите инструкцию по эксплуатации векторного измерителя Р4-37 (см. Приложение А, А2, А4.4).

5) Подготовьте бланк отчета по лабораторной работе, который включает титульный лист установленного образца (см. Приложение В), цель работы (см. 2.1), решение задачи, структурную схему векторного измерителя Р4-37 для измерения проходных параметров (см. Приложение А, рис. А.2).

6.2 Лабораторное задание

1) Подготовьте векторный измеритель Р4-37 к измерению проходных параметров (см. Приложение А, А.2) в диапазоне

$$F = f_{\text{ЕП}} - f_{\text{ИА}\times},$$

где $f_{\text{ИА}\times} = f - F/2$, МГц; $f_{\text{ЕП}} = f + F/2$, МГц;

$F = 100 + n - m$, МГц, $f = 210 + 20 \cdot (n + m)$, МГц; n, m — последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки соответственно.

2) Зафиксируйте значение минимального уровня напряжения опорного канала.

3) Осуществите измерения ГВЗ СВЧ устройства (см. Приложение А, А.4.4) на частоте

$$f = 210 + 20 \cdot (n + m), \text{ МГц,}$$

где n, m — последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки соответственно.

Исследуемое СВЧ устройство выдается преподавателем, который проводит лабораторное занятие.

6.3 Вопросы к защите лабораторной работы:

- 1) Назовите и поясните основные этапы подготовки векторного измерителя Р4-37 к измерению проходных параметров. Какой минимальный уровень напряжения опорного канала?
- 2) Поясните структурную схему векторного измерителя Р4-37 для измерения проходных параметров, особенности включения измерительных СВЧ узлов.
- 3) Как проводится измерения ГВЗ четырехполюсника при помощи векторного измерителя Р4-37?
- 4) Как взаимосвязаны модуль коэффициента отражения и КСВН?
- 5) Как определяется и от чего зависит погрешность измерения ГВЗ четырехполюсника при КСВН входа и выхода устройства не более 1,3?
- 6) Как определяется и от чего зависит дополнительная погрешность измерения ГВЗ четырехполюсника при КСВН входа и выхода устройства более 1,3?

РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1) Винокуров В.И. Электрорадиоизмерения: учеб. пособ. [для радиотехнич. спец. Вузов] / Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г.; под ред. В.И. Винокурова. — [2-е изд., перераб. и доп.]. — М.: Высшая школа, 1986. — 351 с.
- 2) Фрадин А.З. Измерения параметров антенно-фидерных устройств /А. З. Фрадин, Е. В. Рыжков. — [2-е изд., доп.]. — М.: Связь, 1972. — 352 с.
- 3) White J. F. High frequency techniques. An introduction to RF and microwave engineering / White J. F. — A John Wiley & Sons, 2004. — 526 p.
- 4) Dehe A. Microwave measurements / [A. Dehe, K. Beilenhoff, K. Fricke et. al.]. — CRC Press LLC, 2000. — 25 p.
- 5) Ghannouchi F.M. The six-port technique with microwave and wireless applications / Fadhel M. Ghannouchi, Abbas Mohammadi. — Artech House, 2009. — 245 p.

Приложение А

Инструкция по эксплуатации векторного измерителя Р4-37

А.1 Подготовка к проведению измерений входных параметров

1) Соберите схему по рис. А.1.

2) Установите органы управления блока индикаторного (БИ) и генератора качающейся частоты (ГКЧ4) в следующие положения:

- ручку «**МЕТКА**» в среднее положение;
- ручку «**УРОВЕНЬ**» в среднее положение.

3) Включите блоки в сеть и прогрейте в течение 15 мин.

4) Нажмите кнопку ОБЩ. «**×**» два раза.

5) Нажмите кнопки «**|S|**» (КАНАЛЫ), в верхней части экрана электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) должна высветиться запись ДИАПАЗОН «?».

6) Нажмите кнопку «**F1**» — погаснет запись ДИАПАЗОН «?», и появится в нижнем левом углу ЭЛТ знак «**?**».

7) С помощью цифровых кнопок «**0**», «**1**», «**2**»...«**9**» наберите нужное значение начальной частоты ($F1 \geq 0,7$ МГц) полосы перестройки и нажмите кнопку «**■**». На экране ЭЛТ должна появиться запись «**F2=?**».

8) Нажмите кнопку «**F2**» — в правом нижнем углу экрана ЭЛТ должен появиться знак «?».

Полоса перестройки должна быть не менее 10 МГц при $f_{\text{а}} \leq 31$ МГц и не менее 50 МГц при $f_{\text{а}} \geq 31$ МГц.

9) С помощью цифровых кнопок «**0**», «**1**», «**2**»...«**9**» наберите нужное значение конечной частоты полосы перестройки, кроме частот 126...130 МГц и 510...514 МГц и нажмите кнопку «**■**». Должна загореться надпись КАЛИБР РЕЖИМ «?».

10) Нажмите кнопки «**Δ**» (появится знак «**XX?**»), «**■**». Запись КАЛИБР. РЕЖИМ должна погаснуть и появиться запись «**К-А**» и измеряемая величина в децибелах.

11) Нажмите кнопку **ОН** (КАНАЛЫ). На экране ЭЛТ должна индицироваться кривая опорного сигнала, а также величина опорного напряжения в милливольтках на частоте метки и частота метки.

Примечание. При необходимости работы во всем диапазоне частот измерителя нажмите кнопку «**ΔF_{max}**».

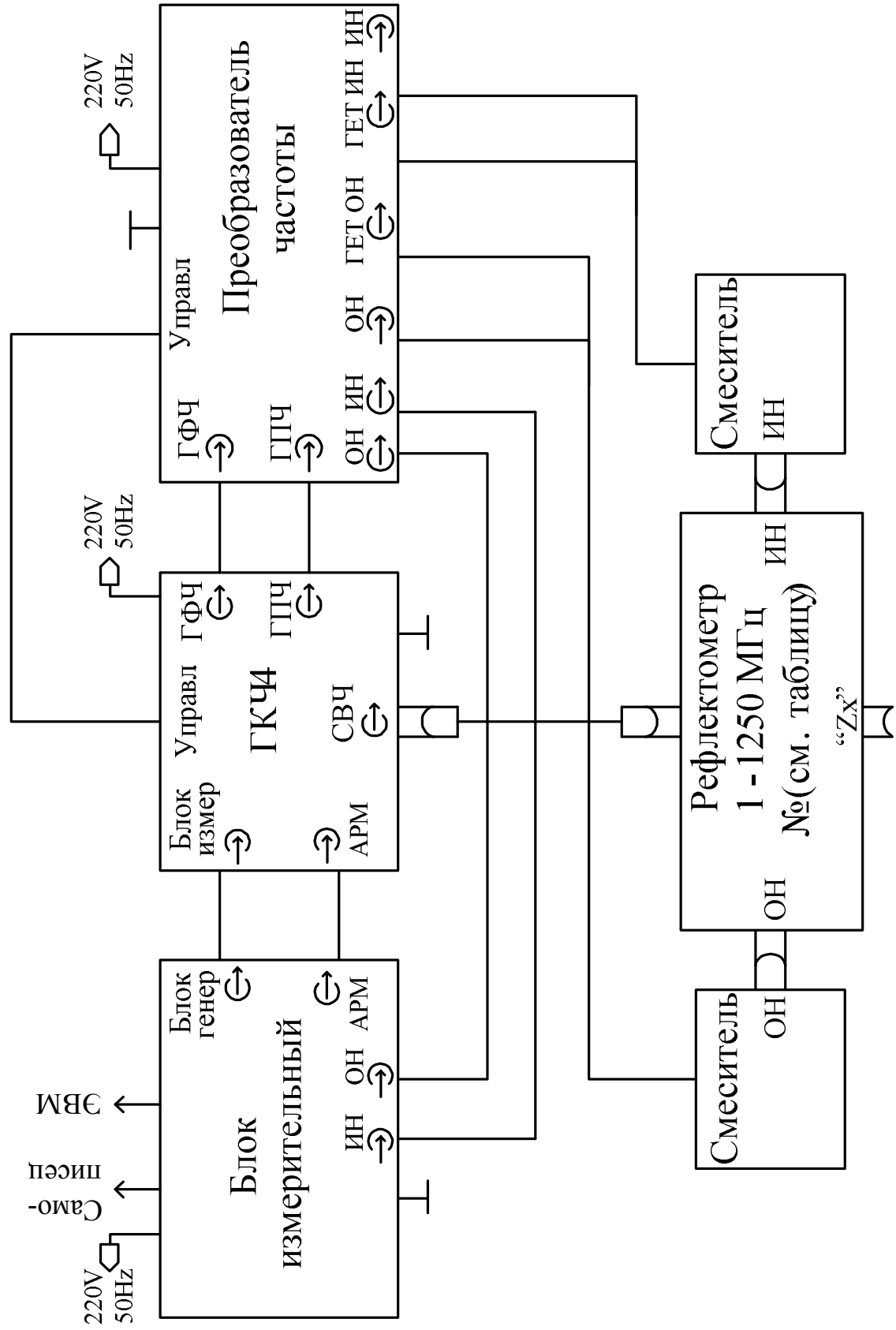


Рисунок А.1 — Структурная схема соединений измерителя Р4-37 при измерении входных параметров

12) Ручкой «УРОВЕНЬ» установите напряжение опорного канала равным $(3,3 \pm 0,1)$ мВ. Если на линии опорного канала наблюдается модуляция или генерация, то устраните методом последовательного приближения при помощи оси резистора, выведенной под шлиц, и ручкой «УРОВЕНЬ», после этого уровень должен сохраниться.

Величина опорного напряжения $(3,3 \pm 0,1)$ мВ соответствует уровню мощности на входе измеряемого устройства порядка $(0,1 \dots 1) \cdot 10^{-6}$ Вт (изменение уровня опорного сигнала в m раз вызывает изменение уровня мощности на входе измеряемого устройства в m^2 раз).

13.1) Нажмите кнопку « $|S|$ » (КАНАЛЫ). Установите метку при помощи ручки МЕТКА в минимум амплитудно-частотной кривой и с помощью оси резистора « $\blacktriangleright$ » на преобразователе частоты установите амплитудно-частотную кривую так, чтобы максимальное значение кривой не выходило за пределы второй сверху линии, сама кривая располагалась симметрично относительно четвертой сверху линии шкалы ЭЛТ, а на лицевой панели включались кнопки «-20», «-20» (ПРЕДЕЛЫ dB).

13.2) Возможна работа с измерителем в ручном режиме. Для этого нажмите кнопки « $\blacktriangleleft$ » (после нажатия должна появиться в нижней части экрана запись АТ КАНАЛ «?»), ОН (ПРЕДЕЛЫ «dB») (должна погаснуть запись АТ КАНАЛ), «-10», «-20» левую, ОН (КАНАЛЫ) и ручкой «УРОВЕНЬ» установите напряжение опорного канала $(3,3 \pm 0,1)$ мВ. Нажмите кнопку ИИ, выключите «-10», дополнительно включите «-20», « $|S|$ » (КАНАЛЫ). Установите с помощью оси резистора « $\blacktriangleright$ » максимальный уровень в требуемые границы.

14) Нажмите кнопку «Ф» (КАНАЛЫ). При нажатой кнопке « $|S|$ » (КАНАЛЫ) на экране ЭЛТ одновременно будут наблюдаться амплитудночастотная и фазочастотная кривые. Если кнопку « $|S|$ » (КАНАЛЫ) вернуть в исходное положение (подсветка погаснет), то можно будет наблюдать только фазочастотную характеристику.

15) Нажмите кнопку «Ф» (ВИД ИЗМЕР) и, перемещая ручкой «МЕТКА» частотную метку по кривой, определите суммарное значение фазы. Если суммарное значение превышает 3000° , то, учитывая направление, в какую сторону необходимо развернуть фазовую характеристику, чтобы выровнять фазовую характеристику и скомпенсировать фазовый сдвиг, нажмите кнопку « $\frown$ » или « $\smile$ ».

16) Наберите с помощью цифровых кнопок необходимое значение угла поворота. Нажмите кнопку « $\blacksquare$ », затем кнопку «0» и скомпенсируйте фазовый набег. Если направление вращения или шаг выбран неверно, то нажмите кнопку « $\times$ » и исправьте ошибку. Аналогичным образом с помощью кнопок « $\uparrow$ », « $\downarrow$ » переместите фазочастотную характеристику к центру экрана ЭЛТ.

Для последовательного изменения наклона или перемещения повторно нажмите кнопки «», «0».

Примечание. При компенсации фазового набега после нажатия одной из кнопок «», «», «» «», набор значений на цифровых кнопках можно начинать с любой цифры за исключением «0» и «1». Если нужно набрать число, начинающееся с 1, то сначала нажать любую кнопку «2», «3»...«9», затем кнопку «», а потом необходимое число.

17) Нажмите кнопку «» на 2...3 с. Должна появиться надпись «КЗ-?», при этом амплитудночастотная и фазочастотная кривые на экране ЭЛТ должны выровняться в пределах всей установленной полосы с неравномерностью не более $\pm 2\%$ по амплитуде $U \pm 1^\circ$ по фазе, что можно проверить, нажав кнопку «» или «Ф» (ВИД ИЗМЕР) и перемещая ручкой «МЕТКА» частотную метку вдоль линии на экране ЭЛТ.

18) Подключите к рефлектометру короткозамыкатель (КЗ) и повторно нажмите кнопку «». Должна погаснуть запись «КЗ-?». На этом заканчивается подготовка измерителя к измерениям входных параметров в установленной полосе частот.

А.2 Подготовка к проведению измерений проходных параметров

1) При измерении коэффициентов передачи A_x от +30 до -80 дБ подготовьте измеритель в соответствии со схемой, изображенной на рис. А.2.

2) Установите органы управления блока индикаторного (БИ) и генератора качающейся частоты (ГКЧ4) в следующие положения:

- ручку «МЕТКА» в среднее положение;
- ручку «УРОВЕНЬ» в среднее положение.

3) Включите блоки в сеть и прогрейте в течение 15 мин.

4) Нажмите кнопку ОБЩ. «» два раза.

5) Нажмите кнопки «» (КАНАЛЫ), в верхней части экрана электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) должна высветиться запись ДИАПАЗОН «?».

6) Нажмите кнопку «F1» — погаснет запись ДИАПАЗОН «?», и появится в нижнем левом углу ЭЛТ знак « ? ».

7) С помощью цифровых кнопок «0», «1», «2»...«9» наберите нужное значение начальной частоты ($F1 \geq 0,7$ МГц) полосы перестройки и нажмите кнопку «». На экране ЭЛТ должна появиться запись «F2=?».

8) Нажмите кнопку «F2» — в правом нижнем углу экрана ЭЛТ должен появиться знак «?». Полоса перестройки должна быть не менее 10 МГц при $f_a \leq 31$ МГц и не менее 50 МГц при $f_a \geq 31$ МГц.

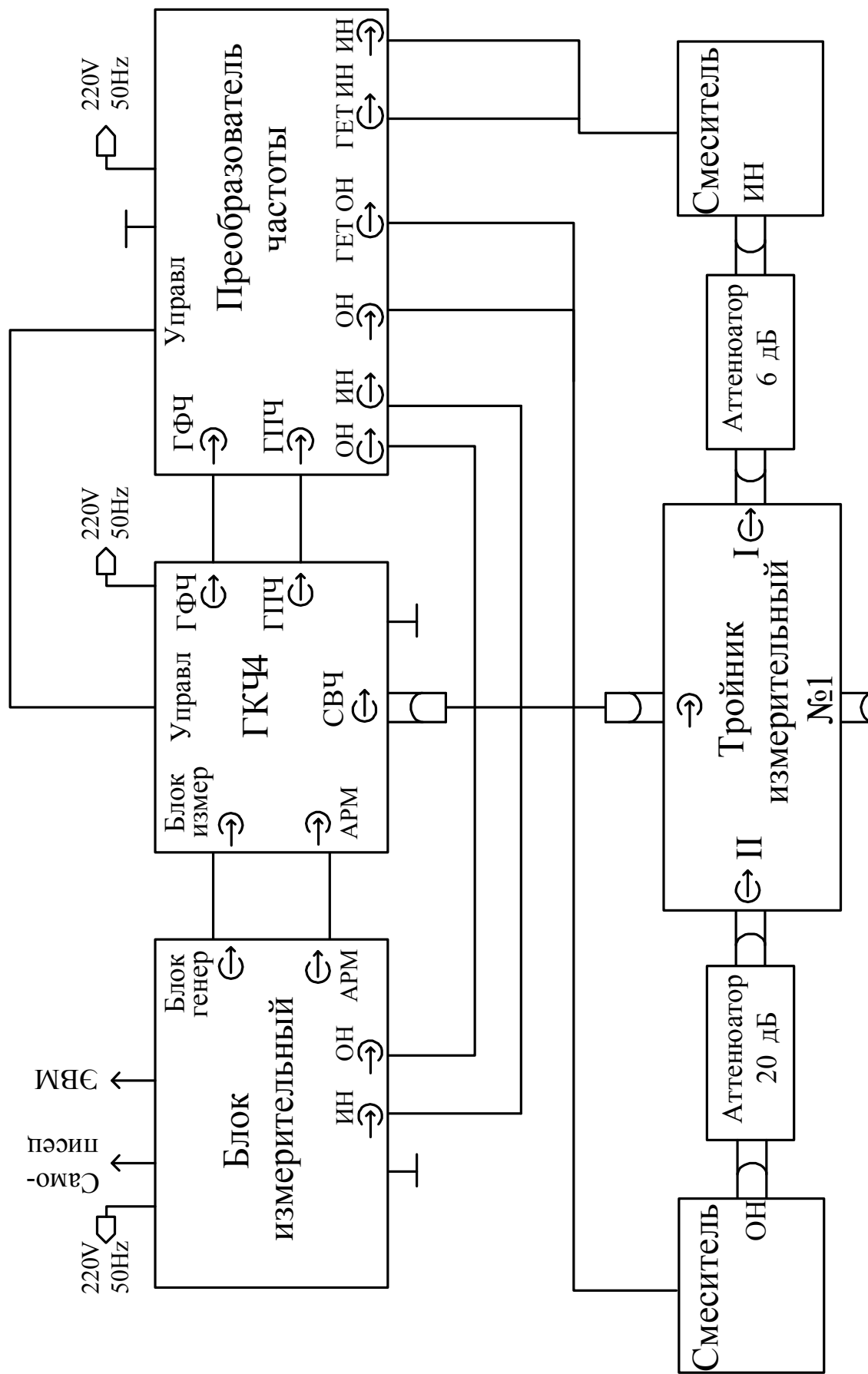


Рисунок А.2 — Структурная схема соединений измерителя Р4-37 при измерении проходных параметров

9) С помощью цифровых кнопок «0», «1», «2»...«9» наберите нужное значение конечной частоты полосы перестройки, кроме частот 126...130 МГц и 510...514 МГц и нажмите кнопку «». Должна загореться надпись КАЛИБР РЕЖИМ «?».

10) Нажмите кнопку «» и после появления надписи КАЛИБР «)-(?» нажмите кнопку «». На экране ЭЛТ должна индицироваться амплитудно-частотная кривая коэффициента передачи. Вместо надписи КАЛИБР «)-(?» должна быть надпись «К-А)-(?».

11) Нажмите кнопку **ОН** (КАНАЛЫ) и при помощи ручки «УРОВЕНЬ» на ГКЧ4 установите уровень опорного напряжения ($3,3 \pm 0,1$) мВ. Если на линии опорного канала наблюдается модуляция или генерация, то устраните методом последовательного приближения при помощи оси резистора, выведенной под шлиц, и ручкой «УРОВЕНЬ», после этого уровень должен сохраниться.

Величина опорного напряжения ($3,3 \pm 0,1$) мВ соответствует уровню мощности на входе измеряемого устройства порядка $(0,1...1) 10^{-6}$ Вт (изменение уровня опорного сигнала в m раз вызывает изменение уровня мощности на входе измеряемого устройства в m^2 раз).

12.1) Нажмите кнопку «» (КАНАЛЫ) и при помощи оси резистора «» на преобразователе частоты установите амплитудно-частотную кривую так, чтобы максимальное значение кривой не выходило за пределы второй сверху линии, а сама кривая располагалась симметрично относительно 4 сверху линии шкалы ЭЛТ.

12.2) Возможна работа с измерителем в ручном режиме. Для работы в ручном режиме нажмите, после установки требуемой полосы частот, кнопки «», «», **ОН** (ПРЕДЕЛЫ «dB»), «», затем **ОН** (КАНАЛЫ) «-10», «-20» левую и установите уровень опорного напряжения ($3,3 \pm 0,1$) мВ. Нажмите кнопку «» (КАНАЛЫ), **ИН** (ПРЕДЕЛЫ «dB») и при помощи резистора «» установите максимальный уровень в требуемые границы.

13) Нажмите кнопку «**Ф**» (КАНАЛЫ). При нажатой кнопке «» (КАНАЛЫ) на экране ЭЛТ одновременно будут наблюдаться амплитудночастотная и фазочастотная кривые. Если кнопку «» (КАНАЛЫ) вернуть в исходное положение (подсветка погаснет), то можно будет наблюдать только фазочастотную характеристику.

14) Нажмите кнопку «**Ф**» (ВИД ИЗМЕР) и, перемещая ручкой «**МЕТКА**» частотную метку по кривой, определите суммарное значение фазы. Если суммарное значение превышает 3000° , то, учитывая направление, в какую сторону необходимо развернуть фазовую характеристику, чтобы выровнять фазовую

характеристику и скомпенсировать фазовый сдвиг, нажмите кнопку «» или «».

15) Наберите с помощью цифровых кнопок необходимое значение угла поворота. Нажмите кнопку «», затем кнопку «0» и скомпенсируйте фазовый набег. Если направление вращения или шаг выбран неверно, то нажмите кнопку «» и исправьте ошибку. Аналогичным образом с помощью кнопок «», «» переместите фазочастотную характеристику к центру экрана ЭЛТ.

Для последовательного изменения наклона или перемещения повторно нажмите кнопки «», «0».

Примечание. При компенсации фазового набега после нажатия одной из кнопок «», «», «» «», набор значений на цифровых кнопках можно начинать с любой цифры за исключением «0» и «1». Если нужно набрать число, начинающееся с 1, то сначала нажать любую кнопку «2», «3»...«9», затем кнопку «», а потом необходимое число.

16) Нажмите кнопку «» на 2...3 с, при этом амплитудночастотная и фазочастотная кривые на экране ЭЛТ должны выровняться в пределах всей установленной полосы частот с неравномерностью не более $\pm 0,2$ дБ по амплитуде и не более $\pm 1^\circ$ по фазе (что можно проконтролировать нажатием кнопок « A_x » и «Ф» (ВИД ИЗМЕР) соответственно), а надпись К-А должна погаснуть.

17) При измерении A_x от -40 до -80 дБ нажмите кнопку **ОН** (КАНАЛЫ) и при нажатой кнопке «» верните в исходное положение кнопки **ОН** (ПРЕДЕЛЫ «dB»).

А.3 Измерения входных параметров

А.3.1 Измерение КСВН и аргумента коэффициента отражения

1) После калибровки в режиме измерения входных параметров (см. А.1) подключите к рефлектометру вместо короткозамкнутой муфты измеряемое устройство и нажмите кнопку (**КСВН** или «Ф»).

2) Установите с помощью ручки «**МЕТКА**» требуемую частоту и отсчитайте значение измеряемого параметра.

При необходимости оперативной оценки частотных зависимостей КСВН наложите на экран ЭЛТ соответствующую шкалу, имеющуюся в комплекте измерителя. При этом необходимо нажать кнопку «» и одну из кнопок « -10 », « -20 » **ИН** (ПРЕДЕЛЫ «dB»), соответствующую пределу используемой шкалы.

А.3.2 Измерение модуля и аргумента коэффициента отражения

1) В измерителе введен дополнительный режим измерения входных параметров — модуля $|\Gamma|$ и аргумента φ коэффициента отражения. Переход от из-

мерения КСВН к измерению модуля $|\Gamma|$ осуществляется нажатием соответствующей кнопки « $|\Gamma|$ ».

2) На экране ЭЛТ будут индцироваться кривые модуля и аргумента коэффициента отражения в линейном масштабе. Измерения можно вести в пределах всей комплексной плоскости изменения коэффициента отражения.

А.3.3 Измерение полных сопротивлений

Измерение и наблюдение полных сопротивлений рекомендуется проводить в полярной системе координат, с использованием диаграмм полных сопротивлений (диаграмм Вольперта-Смита), имеющихся в комплекте измерителя.

1) После калибровки в режиме измерения входных параметров (см. А.1) подключите к рефлектометру вместо муфты короткозамкнутой измеряемое устройство.

2) Нажатием кнопки «О» осуществите переход в полярную систему координат.

3) Наложите на экран ЭЛТ диаграмму полных сопротивлений (диаграмм Вольперта-Смита) и совместите с помощью резисторов « $\leftrightarrow$ », « $\updownarrow$ » центр изображения с центром шкал.

Накладываемые шкалы служат для индикации частотной зависимости измеряемых параметров, а точный отсчет производится аналогично отсчету в декартовой системе координат на частоте метки при нажатии соответствующей кнопки.

4) Нажмите кнопку (R или «X»).

5) Установите с помощью ручки «МЕТКА» требуемую частоту и отсчитайте значение измеряемого параметра.

А.3.4 Измерение ГВЗ отраженной волны

При исследовании входных параметров устройств с большой электрической длиной ($\lambda/2$ и более, где λ – длина волны электромагнитного колебания) дополнительную информацию о характеристиках устройства позволяет получить измерение группового времени задержки (ГВЗ) отраженной волны τ_0 .

Так как полоса частот F , в которой производится индикация ГВЗ, по краям должна быть шире полосы частот измерения Δf не менее чем на 2 %, первоначально необходимо осуществить выбор полосы частот измерения Δf , в которой будет проходить измерение ГВЗ. Необходимо учитывать, что принцип

измерения ГВЗ основан на измерении сдвига фазы $\Delta\varphi$ при изменении частоты на ΔF и последующем вычислении величины

$$\tau = \frac{\Delta\varphi}{2\pi\Delta F},$$

где ΔF — 1/512 часть установленной полосы измерения Δf .

При этом максимальное значение измеряемого ГВЗ τ_0 в наносекундах не должно превышать величины $\tau_0 = 300/\Delta f$ и чувствительность измерителя по ГВЗ в наносекундах будет равна $\Delta\tau = 0,02/\Delta f$.

1) После калибровки в режиме измерения входных параметров (см. А.1) подключите к рефлектометру вместо короткозамкнутой муфты измеряемое устройство.

2) Нажмите кнопку «ГВЗ». После чего на экране ЭЛТ будут индигироваться кривые $|\Gamma|$ и τ_0 , а в верхней части экрана появится индикация значения τ_0 на частоте метки.

3) Установите с помощью ручки «МЕТКА» требуемую частоту и отсчитайте значение измеряемого параметра.

А.4 Измерения проходных параметров

А.4.1 Измерение ослабления от +10 до –40 дБ и аргумента коэффициента передачи

1) После калибровки в режиме измерения проходных параметров при уровне опорного напряжения $(3,3 \pm 0,1)$ мВ (см. А.2) включите в измерительный канал на выходе тройника (между тройником и аттенюатором 6 дБ) исследуемое устройство и нажмите нужную кнопку «Ф» (ВИД ИЗМЕР) или «А_х».

2) Установите с помощью ручки «МЕТКА» требуемую частоту и отсчитайте значение измеряемого параметра.

При работе в ручном режиме введите или верните в исходное положение аттенюатор канала ИН.

В случае измерения устройств с большим перепадом ослаблений можно перейти в логарифмический режим индикации путем нажатия кнопки «lg». При этом одна большая клетка масштабной сетки на экране ЭЛТ будет ориентировочно соответствовать 10 дБ.

А.4.2 Измерение ослабления свыше –40 дБ

1) После калибровки в режиме измерения проходных параметров при уровне опорного напряжения $(3,3 \pm 0,1)$ мВ (см. А.2, в том числе п.17) включите в измерительный канал на выходе тройника (между тройником и аттенюатором 6 дБ) исследуемое устройство и нажмите кнопку «**A_X**».

При размытии кривых на экране ЭЛТ из-за шумов нажмите кнопку «**Λ**», которая уменьшает полосу частот индикаторной части измерителя.

2) Установите с помощью ручки «**МЕТКА**» требуемую частоту и отсчитайте значение измеряемого параметра.

При разбросе показаний цифрового индикатора измеряемого ослабления за результат измерения примите значение, усредненное по нескольким показаниям. Для этого нажмите кнопку «**Σ / N**», отсчет показаний производите спустя ~ 10 с.

А.4.3 Измерение усиления до 30 дБ

1) После калибровки в режиме измерения проходных параметров при уровне опорного напряжения $(3,3 \pm 0,1)$ мВ (см. А.2) включите в измерительный канал на выходе тройника (между тройником и аттенюатором 6 дБ) исследуемое устройство и нажмите кнопку «**A_X**».

2) Установите ручкой «**МЕТКА**» требуемое значение частоты и переключением кнопок «**–10**», «**–20**», «**–20**» при нажатой кнопке **ИН** (ПРЕДЕЛЫ, «dB») выведите амплитудно-частотную кривую в среднюю часть экрана ЭЛТ и произведите отсчет показаний измерителя.

А.4.4 Измерение ГВЗ четырехполюсников

Так как полоса частот F , в которой производится индикация группового времени задержки (ГВЗ), по краям должна быть шире полосы частот измерения Δf не менее чем на 2 %, первоначально необходимо осуществить выбор полосы частот измерения Δf , в которой будет проходить измерение ГВЗ. Необходимо учитывать, что принцип измерения ГВЗ основан на измерении сдвига фазы $\Delta\phi$ при изменении частоты на ΔF и последующем вычислении величины

$$\tau = \frac{\Delta\phi}{2\pi\Delta F},$$

где ΔF — 1/512 часть установленной полосы измерения Δf .

При этом максимальное значение измеряемого ГВЗ $\tau_{\text{ia}\delta}$ в наносекундах не должно превышать величины $\tau_{\text{ia}\delta} = 300/\Delta f$, и чувствительность измерителя по ГВЗ в наносекундах будет равна $\Delta\tau = 0,02/\Delta f$.

1) После калибровки в режиме измерения проходных параметров при уровне опорного напряжения $(3,3 \pm 0,1)$ мВ (см. А.2) включите в измерительный канал на выходе тройника (между тройником и аттенюатором 6 дБ) исследуемое устройство.

2) Нажмите кнопку «ГВЗ». На экране будут наблюдаться кривые коэффициента передачи и ГВЗ измеряемого четырехполюсника.

3) Установите с помощью ручки «МЕТКА» требуемую частоту и отсчитайте значение измеряемого параметра.

Приложение Б

Диаграмма Вольперта-Смита (круговая диаграмма полных сопротивлений)

Для графического изображения полного сопротивления в измерителях типа Р4-37 используется диаграмма Вольперта-Смита (круговая диаграмма полных сопротивлений), названная в честь советского ученого А.Р. Вольперта и американского инженера Ф. Смита, предложивших диаграмму независимо друг от друга в 1939 году (рис. Б.1).

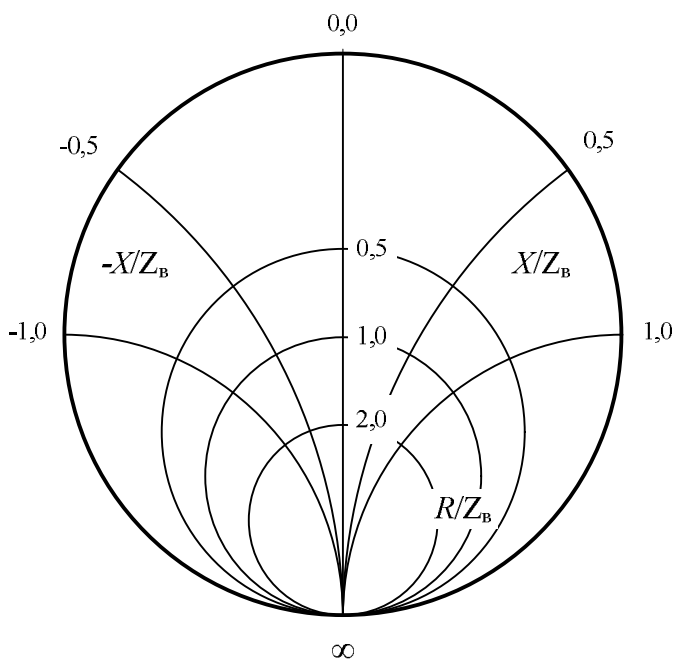


Рисунок Б.1 – Диаграмма Вольперта-Смита
(круговая диаграмма полных сопротивлений)

Круговая диаграмма представляет собою окружность, внутри которой расположены два семейства ортогональных окружностей, соответствующих геометрическим местам точек нормированных сопротивлений $R/Z_{\hat{a}} = \text{const}$ и $\tilde{O}/Z_{\hat{a}} = \text{const}$, где $Z_{\hat{a}}$ – волновое сопротивление измерительного тракта. Применение нормированных сопротивлений позволяет применять диаграмму для измерения полных сопротивлений, включенных в линии передачи с любым волновым сопротивлением $Z_{\hat{a}}$. По вертикальному диаметру отложены значения $R/Z_{\hat{a}}$, соответствующие проходящим через них окружностям равных активных сопротивлений. В местах пересечения окружностей равных реактивных сопротивлений с внешней окружностью помещены значения $\tilde{O}/Z_{\hat{a}}$: в левой половине диаграммы отрицательные, в правой – положительные.

Полное сопротивление определяется по диаграмме Вольперта-Смита в следующем порядке. Находят точку пересечения с двумя ортогональными окружностями $R/Z_{\hat{a}}$ и $\tilde{O}/Z_{\hat{a}}$. Значения $R/Z_{\hat{a}}$ и $\tilde{O}/Z_{\hat{a}}$, соответствующие этому пересечению, после умножения на $Z_{\hat{a}}$ позволяют определить $\tilde{Z} = R + iX$.

Как пример на рис. Б.2 изображены диаграммы Вольперта-Смита с отмеченными на них значениями полного нормированного сопротивления $\tilde{Z}/Z_{\hat{a}} = R/Z_{\hat{a}} + i\tilde{O}/Z_{\hat{a}}$. В частности, точка пересечения пунктирных линий на рис. Б.2,а определяет значение $\tilde{Z}/Z_{\hat{a}} = 0,3 - i0,7$, а на рис. Б.2,б соответственно $\tilde{Z}/Z_{\hat{a}} = 0,7 + i0,8$.

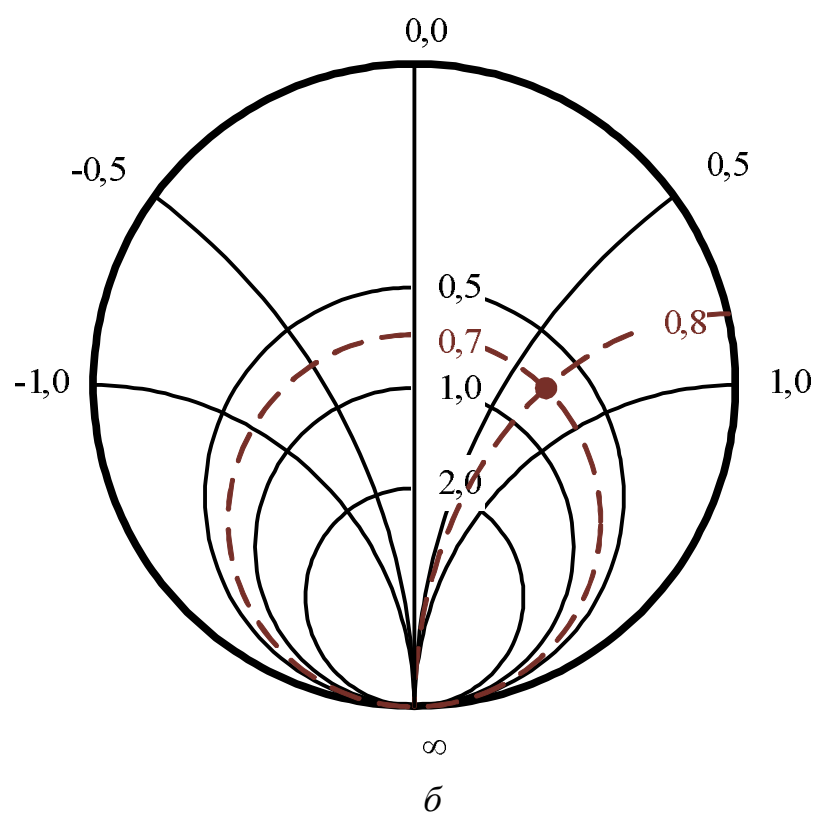
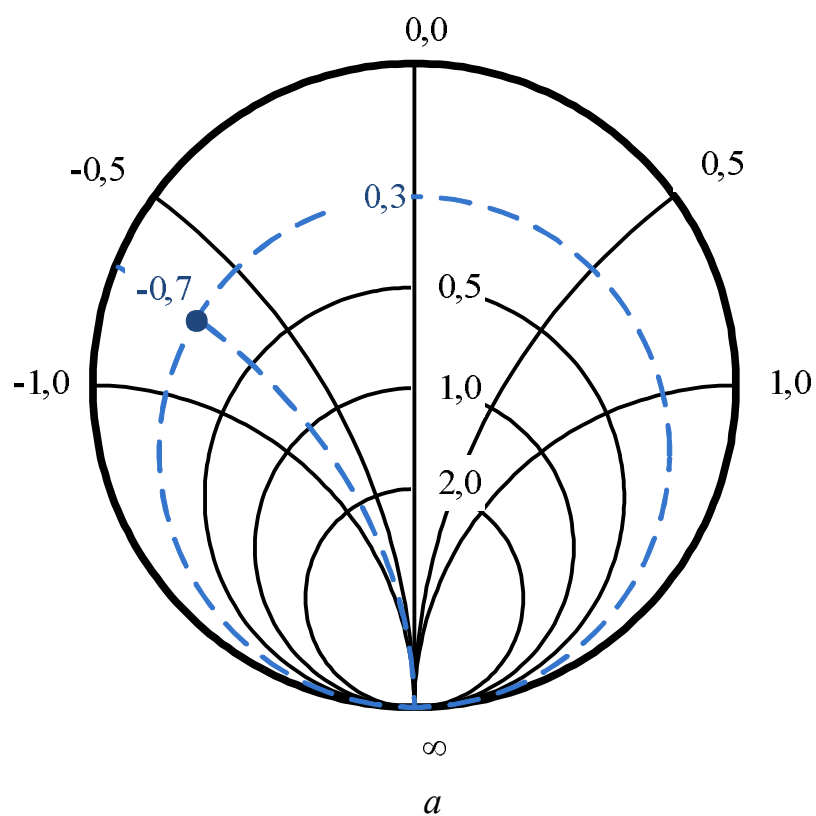


Рисунок Б.2 – Примеры изображения
численных значений полных сопротивлений
на диаграмме Вольперта-Смита

Приложение В

Титульный лист установленного образца

*Министерство образования и науки Украины
Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова*

Кафедра технической электродинамики и систем радиосвязи

ОТЧЕТ

по лабораторной работе

*«Измерения параметров микроволновых трактов
при помощи векторного измерителя Р4-37»*

***Измерение КСВН, модуля и аргумента
коэффициента отражения***

*Выполнил: студент гр. Р 5.203
Петров Петр Петрович
Номер зачетной книжки 000001*

*Проверил: проф. каф. ТЭД и СРС
Проценко М.Б.*

Одесса 2014