

КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОАКСІАЛЬНОГО ТИПУ ПОЛІМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ

Розглянуті конструктивні особливості чутливих елементів коаксіального типу поліметричних систем з метою підвищення точності вимірів.

Ключові слова: чутливий елемент, хвильовий опір, діелектрична шайба.

Рассмотрены конструктивные особенности чувствительных элементов коаксиального типа полиметрических систем с целью повышения точности измерений.

Ключевые слова: чувствительный элемент, волновое сопротивление, диэлектрическая шайба.

Structural features of coaxial type sensing elements of polymeric systems are considered in order to improve measurement precision.

Key words: sensing element, wave impedance, dielectric washer.

Постановка проблеми. Використання методу імпульсної поліметрії в інформаційно-вимірювальній техніці має відносно коротку історію [1-3]. Спочатку він був розроблений і використовувався при проектуванні систем автоматизованого дистанційного контролю параметрів завантаження і посадки суден. Проте більш широке використання цей метод отримав на об'єктах зберігання і транспортування рідких енергоносіїв (нафта, нафтопродукти, зріджений газ та інше.). В основу покладений метод імпульсної рефлектометрії [2], що отримав розвиток як метод імпульсної поліметрії. Суть методу полягає в наступному. У двопровідну лінію передачі – чутливий елемент (ЧЕ), встановлений в резервуарі з контрольованим середовищем, посилається високочастотний і малопотужний зондуєчий імпульс, який поширюється по лінії зі швидкістю V , що визначається діелектричною проникністю середовища ϵ . На межі розділу двох середовищ з різною діелектричною проникністю, наприклад, повітря-рідина або рідина-рідина, виникає різкий стрибок хвильового опору – неоднорідність. Імпульс частково відбивається від неоднорідності хвильового опору і повертається на початок лінії. Аналоговий сигнал, який містить інформацію про зондуєчий і відбиті імпульси, називається рефлектограмою. При неточному виготовленні ЧЕ в ньому виникають конструктивні неоднорідності, які роблять істотний вплив на результат виміру.

Мета даної роботи – розглянути особливості конструктивної побудови ЧЕ коаксіального типу для можливого зменшення апаратних похибок поліметричних вимірювальних систем.

Виклад основного матеріалу. Коаксіальний ЧЕ – це сукупність двох провідників, розташованих один в

іншому та ізольованих один від одного. ЧЕ має жорстку конструкцію і повітряне заповнення. Внутрішній провідник кріпиться на діелектричних шайбах.

Зовнішній провідник коаксіального ЧЕ підключається до такого полюсу генератора, потенціал якого весь час дорівнює нулю, тобто заземляється. При цьому на зовнішній поверхні зовнішнього провідника немає ні струмів, ні зарядів, вони є лише на зовнішній поверхні внутрішнього провідника і на внутрішній поверхні зовнішнього провідника. Електромагнітне поле коаксіального ЧЕ екрановане зовнішнім провідником, внаслідок чого відсутнє випромінювання і вплив зовнішніх полів.

Хвильовий опір коаксіального ЧЕ і оптимальне співвідношення діаметрів провідників

Значення точної величини хвильового опору коаксіального ЧЕ необхідне при проведенні поліметричних вимірів. Хвильовий опір даного ЧЕ визначається наступним виразом:

$$W = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \ln \frac{D}{d} = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \lg \frac{D}{d}, \text{ Ом},$$

де ϵ – відносна діелектрична проникність рідкого середовища; D – внутрішній діаметр зовнішнього провідника; d – діаметр внутрішнього провідника.

При конструюванні коаксіального ЧЕ необхідно в першу чергу вибрати діаметри внутрішнього і зовнішнього провідників і встановити їх в найвигідніший стан. Загасання коаксіального ЧЕ може бути визначене по наступній формулі (без врахування втрат в діелектрику):

$$\alpha = 8.69 \cdot \frac{R}{2} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{6 \cdot \sqrt{f \cdot \epsilon} \left(1 + \frac{D}{d}\right) \cdot 10^{-3}}{D \cdot \ln \frac{D}{d}}, \text{ дБ},$$

де R – повний активний опір коаксіального датчика, Ом; C – ємність датчика, Ф; L – індуктивність датчика, Гн; f – частота струму, Гц.

Виразимо відношення D/d через X . З даного виразу виходить, що зі збільшенням X його чисельник зростає лінійно, а знаменник зростає по логарифмічному закону. Дослідивши дану формулу на мінімум загасання залежно від X ($\frac{\partial \alpha}{\partial X} = 0$), отримаємо, що α мінімально при співвідношенні $\ln\left(\frac{D}{d}\right) = 1 + \frac{d}{D}$. Таким чином, оптимальна конструкція ЧЕ матиме місце при $X = 3.6$. Це співвідношення справедливе для ЧЕ з однаковими провідниками. Якщо провідники виготовлені з різних металів, то мінімальне загасання визначається з наступного виразу:

$$\ln \frac{D}{d} = 1 + \frac{D}{d} \sqrt{\frac{\sigma_d}{\sigma_D}},$$

де σ_d і σ_D – провідність металів внутрішнього і зовнішнього провідників. Доцільно вибрати внутрішній і зовнішній провідники з однакового матеріалу, що має малий погонний опір.

Порушення оптимального співвідношення в бік зменшення пов'язане з різким зростанням загасання. Тому у ряді випадків доцільно прийняти відношення D/d більше оптимального. При виготовленні коаксіального ЧЕ доводиться також відступати від оптимального співвідношення D/d , якщо хвильовий опір ЧЕ строго нормований (наприклад, $W=75$ Ом). В цьому випадку відношення D/d визначається за формулою:

$$D/d = e^{\frac{W}{60} \sqrt{\epsilon}}.$$

Вплив механічних допусків

До механічних допусків відносяться допуски на діаметри D і d і ексцентриситет. Розрахунок ємності коаксіального ЧЕ з ексцентриситетом по методу багатократних послідовних відбиттів дає:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\operatorname{arch} \frac{D^2 + d^2 - 4e^2}{2Dd}}, \Phi / \text{м},$$

де e – ексцентриситет (неспівпадання вісей внутрішнього і зовнішнього провідників).

При $e=0$

$$\operatorname{arch} \frac{D^2 + d^2}{2Dd} = \ln \frac{D}{d}. \quad (1)$$

Це доводиться за допомогою формули, відомої з теорії гіперболічних функцій:

$$\operatorname{arch} x = \ln \left(x + \sqrt{x^2 - 1} \right).$$

Відповідно до формули (1) та:

$$W = \sqrt{\frac{L}{C}} - \text{хвильовий опір ідеальної лінії};$$

$$LC = \epsilon_0 \mu_0 \mu - \text{добуток зовнішньої індуктивності і ємності},$$

отримуємо

$$W = K \cdot \operatorname{arch} \frac{D^2 + d^2 - 4e^2}{2Dd}, \text{ де при } \mu = 1$$

$$K = \frac{59.9586(1 \pm 1 \cdot 10^6)}{\sqrt{\epsilon}}. \quad (2)$$

При малих значеннях ексцентриситету ($e \ll d$) формула (2) спрощується:

$$W \approx K \cdot \ln \left[\frac{D}{d} \cdot \left(1 - \frac{4e^2}{D^2 - d^2} \right) \right].$$

Реальний ЧЕ має механічні допуски на діаметри, тому

$$W \approx K \cdot \ln \left[\frac{D_n + \Delta D}{d_n + \Delta d} \cdot \left(1 - \frac{4e^2}{D^2 - d^2} \right) \right] =$$

$$= K \cdot \left(\ln \frac{D_n}{d_n} + \frac{\Delta D}{D_n} - \frac{\Delta d}{d_n} - \frac{4e^2}{D^2 - d^2} \right)$$

де D_n, d_n – номінальні значення діаметрів провідників; $\Delta D, \Delta d$ – відхилення від номінальних значень діаметрів провідників.

Конструктивні неоднорідності в коаксіальних ЧЕ

Як вже згадувалося вище, при виготовленні ЧЕ може виникнути деформація у вигляді ексцентриситету в розташуванні провідників, порушується їх форма, постійність взаємного розташування і тому подібне. В результаті змінюються параметри і ЧЕ перестає бути однорідним по довжині.

Можна виділити два види неоднорідностей: внутрішні – в межах довжини ЧЕ; і стикові, обумовлені відмінністю характеристик довжин, що сполучаються. Стикові неоднорідності, як правило, перевищують внутрішні. Неоднорідність ЧЕ позначається головним чином на його хвильовому опорі, який на ділянках неоднорідностей відрізняється від номінального.

Неоднорідності кола враховуються через коефіцієнти відбиття:

$$\Gamma = \frac{W'_e - W_e}{W'_e + W_e} = \frac{\Delta W_e}{2W_e},$$

де W_e і W'_e – хвильові опори сусідніх неоднорідних ділянок ЧЕ.

Відхилення хвильового опору визначається за формулою:

$$\Delta W_e = \frac{2W_e}{\Gamma}.$$

Хвильовий опір ЧЕ залежить від трьох чинників: ϵ, d і D . Якщо мати на увазі, що неоднорідність параметрів $\Delta \epsilon, \Delta d$ і ΔD порівняно невелика, відхилення хвильового опору від середнього значення (хвильягість) може бути виражена рівнянням:

$$\Delta W_e = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \left(\frac{\Delta D}{D} - \frac{\Delta d}{d} - \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \cdot \ln \frac{D}{d} \right).$$

Найбільший вплив на коливання хвильового опору надає відхилення розмірів зовнішнього провідника і неоднорідність ізолюючого середовища (рідини), що викликає коливання значень діелектричної проникності. Реальний коаксіальний ЧЕ можна розглядати як неоднорідну послідовність, складену з окремих однорідних ділянок. Електромагнітна хвиля, поширю-

ючись по такому ЧЕ і зустрічаючи на своєму шляху неоднорідність, частково відбивається від неї і повертається на початок лінії.

За наявності декількох неоднорідних ділянок хвиля зазнає серію часткових відбиттів, і циркулюючи по ЧЕ, викликає додаткове загасання і спотворення характеристик ЧЕ. Неоднорідності в ЧЕ приводять до появи двох додаткових потоків енергії в лінії: зуст-

річного потоку енергії, що складається з суми елементарних відбитих хвиль в місцях неоднорідностей і рухомого на початок лінії, і попутного струму енергії, що виникає через подвійні відбиття і рухомого до кінця лінії, спільно з основною енергією, яка передається по ЧЕ (рис. 1).

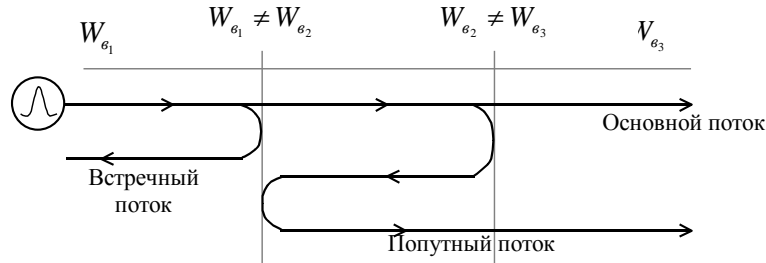


Рис. 1. Схема відбитих потоків в неоднорідному коаксіальному ЧЕ

Попутний потік виникає внаслідок того, що спочатку відбиті хвилі рухаються на початок ЧЕ, зустрічаються місця неоднорідності і частково відбиваються, прямуючи до кінця ЧЕ. Попутний потік, поширюючись разом з основним, створює форму сигналу, який передається і також створює перешкоди передачі.

Часто при поліметричних вимірах необхідна наявність допоміжних відбитих сигналів. В цьому

випадку в ЧЕ спеціально вводяться конструктивні неоднорідності шляхом зменшення або збільшення діаметрів провідників (залежно від бажаної полярності відбитого допоміжного імпульсу). Еквівалентна схема стрибка хвильових опорів може бути представлена у вигляді стику двох ліній з хвильовими опорами W_1 і W_2 , шунтованого ємністю.

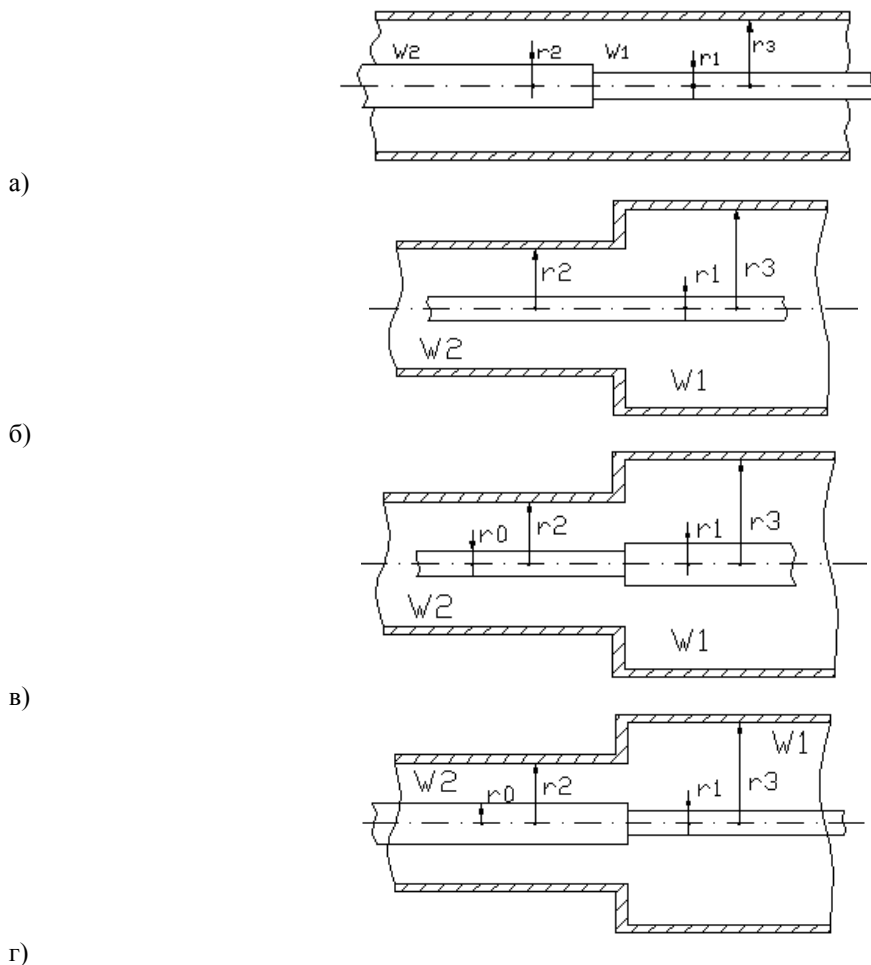


Рис. 2. Види стрибків хвильового опору

$$KBX = 1 - \frac{2\pi b}{\lambda_0}(\epsilon_r - 1),$$

Діелектричні шайби

Основне призначення діелектричних шайб – кріплення внутрішнього провідника в центрі коаксіального ЧЕ. Шайби викликають зміну хвильового опору і постійної поширення. Відбиття від шайб зменшуються при використанні тонших шайб. Для таких шайб коефіцієнт біжучої хвилі (КБХ):

де b – товщина шайби; λ_0 – середня довжина хвилі в робочому діапазоні частот; ϵ_r – діелектрична проникність шайби.

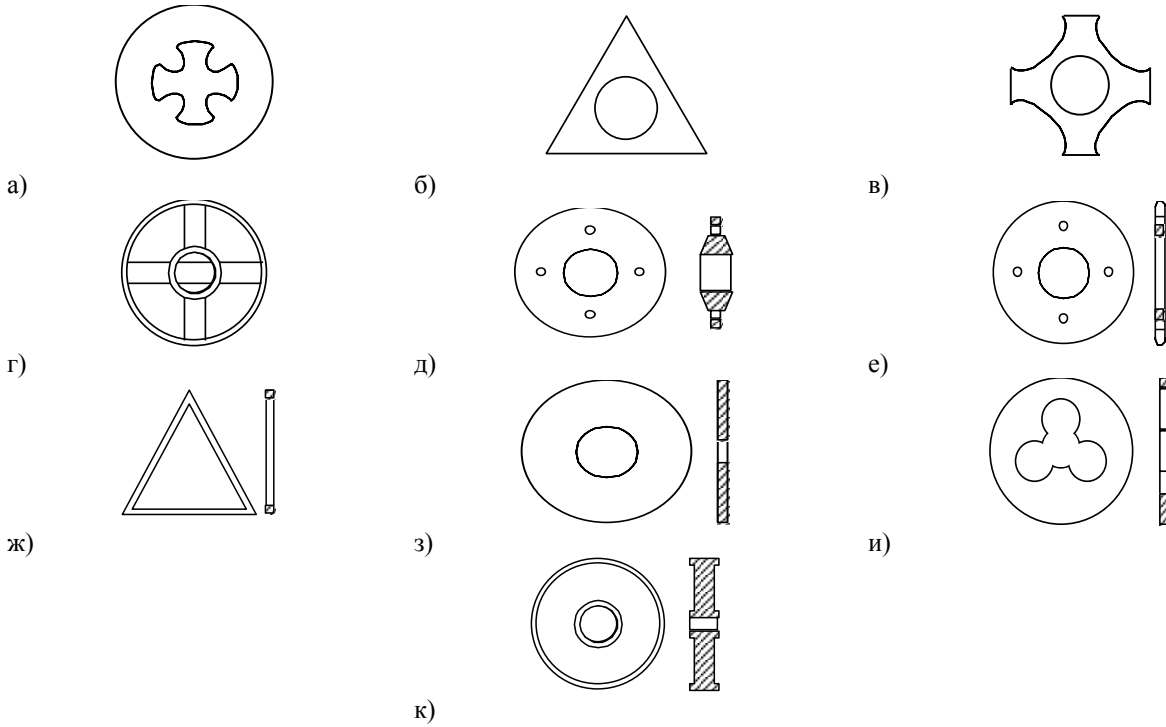


Рис. 3. Деякі форми діелектричних шайб в коаксіальному ЧЕ

Форма діелектричних шайб (рис. 3) вибирається такою, щоб при мінімальній кількості матеріалу були досягнуті максимальна величина пробивної напруги і необхідне центрування внутрішнього провідника лінії. Шайба на рис. 4 викликає зміну хвильового опору і порушує однорідність лінії. Шайбу можна

представити у вигляді ділянки лінії завдовжки $l = 2l_1$ з хвильовим опором W_1 , в середині якого включена ємність (рис. 5).

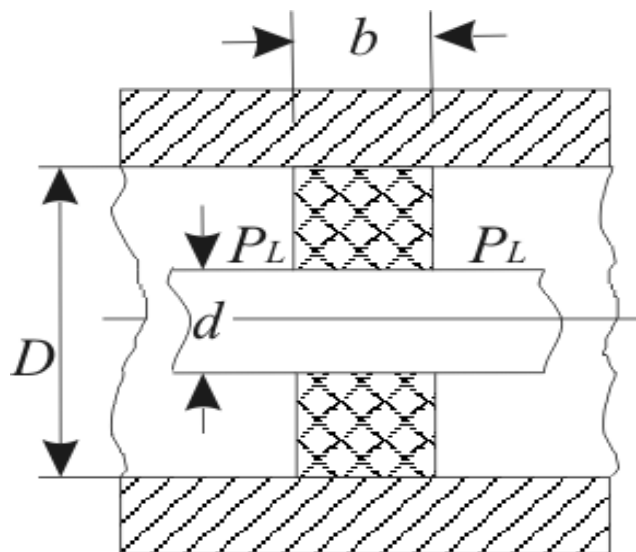


Рис. 4. Опорна шайба в коаксіальній лінії

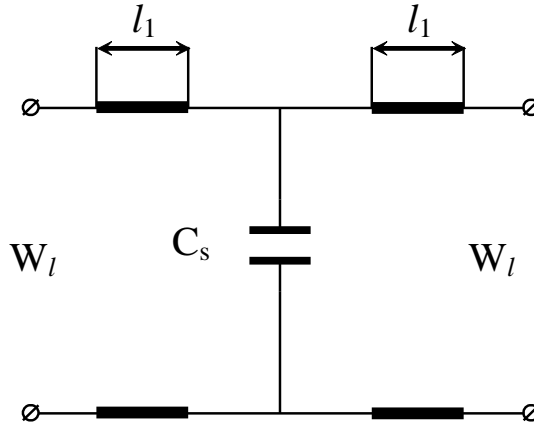


Рис. 5. Схема заміщення шайби відрізком лінії і ємністю

Для компенсування паралельної ємності C_s (для узгодження хвильового опору шайби з хвильовим опором лінії) на ділянці лінії, займаній шайбою, змінюють діаметри провідників лінії, як показано на рис. 6. Міра компенсації паралельної ємності слабо залежить від частоти до тих пір, поки середня довжина хвилі робочого діапазону λ_0 досить

сильний відрізняється від величини πl , тобто $\lambda_0 = (3 \div 4)\pi l$, де $2l_1$ – діюча довжина шайби. При $b/\lambda_0 < 0.1/\sqrt{\epsilon_r}$ можна вважати, що $l=b$ (рис. 4), а в інших випадках $l = b \ln \frac{S}{s} / \ln \frac{D}{d}$.

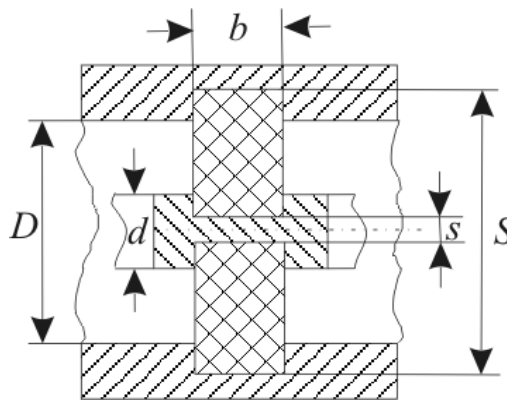


Рис. 6. Форма шайби коаксіальної лінії для компенсації зміни хвильового опору на ділянці шайби

Розміри втоплених шайб обираються так, щоб хвильовий опір на ділянці шайби дорівнював хвильовому опором лінії:

$$W = 60 \ln \frac{D}{d} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{S}{s}$$

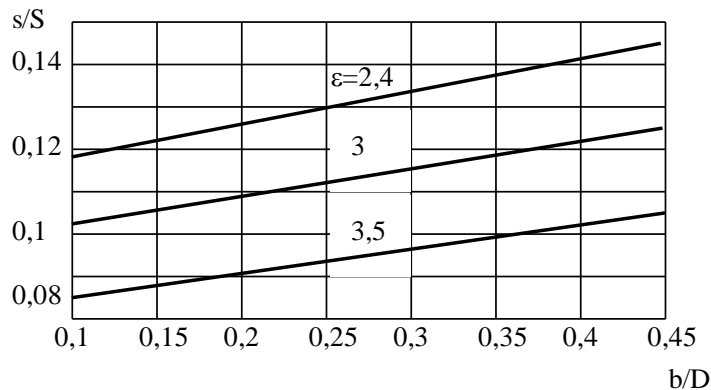


Рис. 7. Графік для визначення основних розмірів шайб з різними ϵ_r

Діаметри шайб для коаксіальної лінії можна вибрати з графіка на рис. 7 (позначення вказані на рис. 6). Для зменшення відбиттів від шайби (а також у випадку, якщо розмір обираємо з конструктивних міркувань більше розрахункового) зменшують діюче

значення діелектричної проникності шайби шляхом видалення частини діелектрика (виточки на шайбі), як показано на рис. 8.

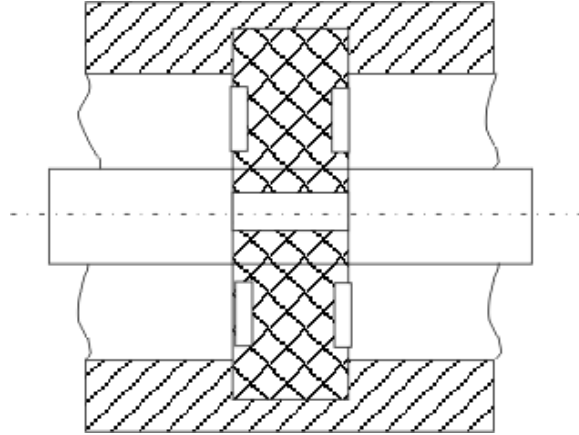


Рис. 8. Форма шайби з виточкою

Висновки. Проаналізовані конструктивні особливості в ЧЕ коаксіального типу, враховуючи і компенсуючі які, можна істотно підвищити точність вимірів. Отримано оптимальне співвідношення діаметрів

провідників, яке дозволяє звести загасання сигналу до мінімуму. Розглянуто вплив механічних допусків на хвильовий опір.

ЛІТЕРАТУРА

1. On-board Computer Aided System for Automated Remote Control of Ullage, Separation Level and Temperature of Liquid and Friable Cargoes/ Yu. Zhukov, B. Gordeev and oth. – Proc of Int. Conf CABS'95. – Varna, BSHC, 1995. – P. 19.
2. Гордеев Б. Н. Применение метода импульсной рефлектометрии для измерения уровня и расстояния до раздела жидких сред / Б. Н. Гордеев, А. Ю. Грешнов, Ю. Д. Жуков, Е. О. Прищепов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1995. – №4. – С. 27-29.
3. Жуков Ю. Д. Полиметрические информационные системы для объектов транспорта, промышленности и сельского хозяйства / Ю. Д. Жуков, Б. Н. Гордеев. – В зб. Наук. Праць СИЭТ – 99, вип. 5. – Київ, «Фада», 1999. – С. 256-257.

Рецензенти: д.т.н., професор Жуков Ю. Д.;
к.т.н., доцент Обрубов А. В.

© Гордеев Б. М., 2011
© Грешнов А. Ю., 2011

Стаття надійшла до редколегії 11.11.10.