

УДК 658.562:678.620.19

**ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ОБ'ЄМНОЇ ЩІЛЬНОСТІ  
ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ****Дроменко В. Б., Бондарська М. С., Ахонченко Д. М.**

Київський національний університет технологій та дизайну

*У статті розглянуто питання побудови діелькометричного пристрою контролю об'ємної щільності нетканих матеріалів. Розроблений метод підвищення точності вимірювання об'ємної щільності. Запропонована структурна схема пристрою контролю об'ємної щільності нетканих матеріалів.*

**Ключові слова:** неткані синтетичні матеріали, об'ємна щільність, пристрій автоматичного контролю, діелькометричний датчик

У виробництві нетканих матеріалів з синтетичних волокон після операцій холстоутворення, голкопробивання, термоусадки необхідно отримання поточної інформації про значення об'ємної щільності матеріалу. Аналіз існуючих засобів неруйнівного контролю матеріалів [1, 2, 4] показує, що найбільш доцільним є використання пристрою, який реалізує діелькометричний метод контролю. Достатньо розповсюджені резонансні методи вимірювання електричної ємності. Для зменшення похибок вимірювання, пов'язаних з нестабільністю частоти та амплітуди напруги генератора накачки та нестабільністю параметрів коливального контуру використовують диференціальний метод вимірювання малих ємностей на боковій гілці резонансної кривої [3, 4]. Відомі пристрої [5, 6] не забезпечують високу точність вимірювання при зміні об'ємної щільності матеріалу після операцій голкопробивання та термоусадки. Крім того, нестабільність елементів схеми викликає додаткові похибки.

**Постановка завдання**

Завданням дослідження була розробка принципу дії та структурної схеми пристрою контролю об'ємної щільності нетканого матеріалу з підвищеною точністю вимірювання за рахунок збудження резонансного контуру одним генератором.

Об'єктом дослідження обрано діелькометричний пристрій контролю об'ємної щільності нетканих матеріалів. При вирішенні поставленої задачі були використані сучасні методи теоретичних досліджень, що будуються на теорії електричних ланцюгів постійного та змінного струмів та основних положеннях інформаційно-вимірювальної техніки.

**Результати досліджень**

Для виключення впливу нестійкості та неідентичності двох генераторів, що збуджують коливальний контур на двох резонансних частотах було запропоновано структурну схему пристрою подану на рис. 1.

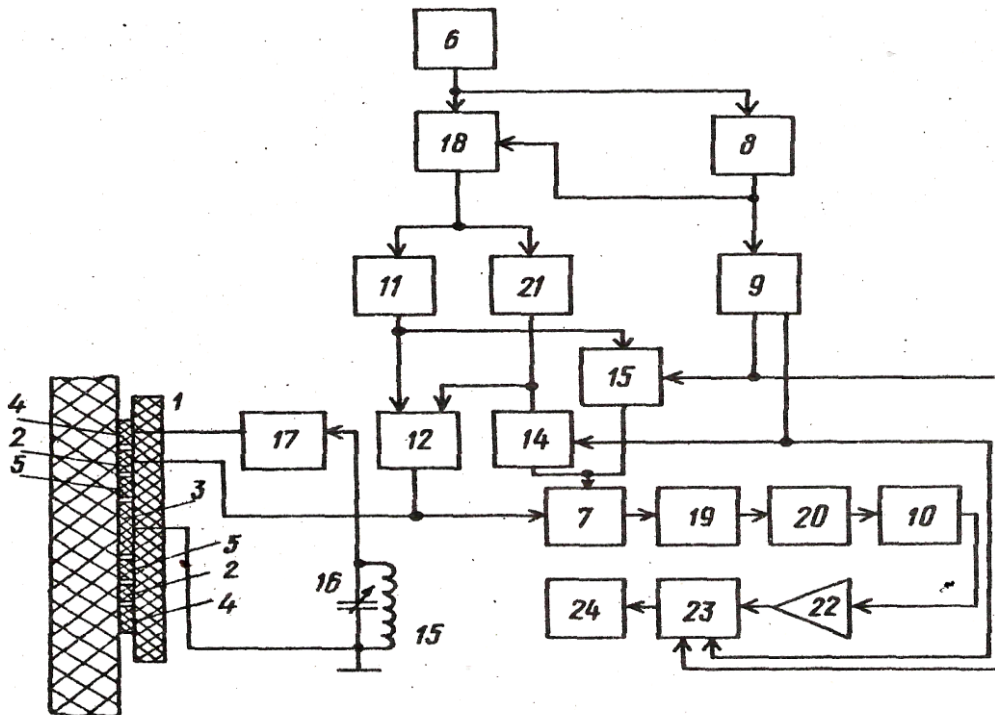


Рис. 1. Структурна схема пристрою контролю об'ємної щільності нетканих матеріалів

У системі датчика, що складається з діелектричної підстави 1 з високопотенціальним 2 і низкопотенціальним 3 електродами створюється електричне поле, у якому знаходиться матеріал з контрольованою об'ємною щільністю. У такій системі ємність датчика пропорційна діелектричній проникності матеріалу й залежить від його щільності [3, 4]

$$C(\rho) \approx A \left( \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \frac{e^{Bh} - q}{e^{Bh} - q} \right), \quad (1)$$

де  $\varepsilon_1$  – відносна діелектрична проникність підстави датчика;

$\varepsilon_2$  – відносна діелектрична проникність контрольованого матеріалу, при незмінному складі останнього, пропорційна його об'ємної щільності;

$q = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}$  – коефіцієнт, що відображає розходження в діелектричних властивостях

контрольованого матеріалу й навколишнього середовища;

$\varepsilon_3$  – відносна діелектрична проникність навколишнього середовища (повітря);

$A, B$  – постійні коефіцієнти обумовлені площею конденсатора датчика, шириною електродів і зазорів між ними;

$h$  – товщина контрольованого матеріалу.

Електричне поле датчика створюється за допомогою сигналу генератора 6 частотою  $\omega = \omega_0$

$$U_6 = U_{m6} \cos(\omega_0 t + \varphi_1), \quad (2)$$

де  $\omega_0$  – резонансна частота резонансного контуру.

Сигнал  $U_6$  перемножується в блоці 18 із сигналом низької частоти  $\Omega$

$$U_8 = U_{m8} \cos(\omega_0 t + \varphi_8), \quad (3)$$

який формується дільником частоти 8 з коефіцієнтом розподілу  $n_1$ . Значення низької частоти  $\Omega \approx \Delta\omega/2 = \omega_0/n_1$  вибирають приблизно рівним половині ширини резонансній кривій  $\Delta\omega$  на рівні відповідному точкам максимальної крутизни резонансної кривої коливального контуру, тобто частота

$$\Omega \approx \Delta\omega/2 = \omega_0/n_1. \quad (4)$$

У результаті перемноження сигналів від генератора 6 та дільника 8 у блоці 18 формується двохчастотний сигнал з подавленою резонансною частотою  $\omega_0$  та бічними частотами виду  $\omega_0 \pm \Omega$

$$U_{18} = k'_n U_{m1} U_{m8} \left\{ \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_1 - \varphi_8] + \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_1 + \varphi_8] \right\}, \quad (5)$$

де  $k'_n$  – масштабний коефіцієнт перетворення блоку 18.

Складова резонансної частоти  $\omega_p = \omega_0 - \Omega$  являє собою сигнал нижній бічної частоти резонансної кривої, а складова сумарної частоти  $\omega_c = \omega_0 + \Omega$  – сигнал верхньої бічної частоти щодо резонансної.

Із двохчастотного сигналу (5) виділяють роздільно фільтрами 10 й 21 сигналу різницевої та сумарної частот

$$U_{21} = k'_n k_p U_{m1} U_{m8} \cos(\omega_p t + \varphi_1 - \varphi_8), \quad (6)$$

$$U_{11} = k'_n k_c U_{m1} U_{m8} \cos(\omega_c t + \varphi_1 + \varphi_8), \quad (7)$$

де  $k_p$  та  $k_c$  – коефіцієнти фільтрації на частотах  $\omega_p$  та  $\omega_c$ .

Сигнали різницевої (6) та сумарної (7) частот складаються в суматорі 12 та збуджують первинну обмотку автотрансформатора 15, до вторинної обмотки якого підключені підстроєчний конденсатор 16 та ємність електродної системи; вимірювальний електрод 2 – контрольований електрод 3, на нижній (різницевої) та верхньої (сумарної) бічних частотах.

Комплексний коефіцієнт передачі резонансного контуру, утвореного автотрансформатором 15, підстроєчним конденсатором 16, електродами 2, 3, при малих розстройках визначається виразом

$$k(\omega) = \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)} = \frac{Q}{j} \cdot \frac{1}{1 + j\lambda Q}, \quad (8)$$

де  $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$  – резонансна частота контуру;

$C$  – ємність, утворена електродною системою 2-3 та підрядковим конденсатором 16, що виходить у резонансний контур, при відсутності контрольованого матеріалу;

$L$  – індуктивність контуру, обумовлена автотрансформатором 15;

$Q = \omega_0 L / r$  – добротність резонансного контуру, з опором втрат  $r$ ;

$\lambda = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$  – відносна розстройка контуру;

$\Delta\omega$  – абсолютна розстройка контуру.

При цьому модуль коефіцієнта передачі контуру

$$|k| = \frac{Q}{\sqrt{1 + (\lambda Q)^2}}, \quad (9)$$

а аргумент коефіцієнта передачі

$$\varphi = \arctg \lambda Q. \quad (10)$$

Напруга на резонансному контурі з урахуванням амплітуд та початкових фаз гармонійних складових бокових частот визначається вираженням:

$$U_{15} = k'_n k_p U_{m1} U_{m8} \cos(\omega_p t + \varphi_1 - \varphi_8 +) + k'_c k_c U_{m8} \cos(\omega_c t + \varphi_1 + \varphi_8 + \varphi_c), \quad (11)$$

де  $k'$  та  $k'_c$  – коефіцієнт передачі резонансного контуру на частоті  $\omega_p$  та  $\omega_c$  відповідно;  $\varphi_p$  та  $\varphi_c$  – фазові зсуви, внесені розстроєним контуром на частотах  $\omega_p$  та  $\omega_c$  відповідно.

Параметри резонансного контуру підібрані таким чином, що для частоти  $\omega_p$  кривій ненавантаженого датчика, що відповідає максимальній крутості АЧХ ( $\lambda = -0,83$ ), а для частоти  $\omega_c$  – на аналогічній точці правої гілки резонансної кривої ( $\lambda = +0,83$ ). Коефіцієнт передачі резонансного контуру на частоті  $\omega_p$  визначається його розстройкою на цій частоті

$$k_p = \frac{Q}{\sqrt{1 + (\lambda_p Q)^2}}, \quad (12)$$

на частоті  $\omega_c$  відповідно

$$k_c = \frac{Q}{\sqrt{1 + (\lambda_c Q)^2}}, \quad (13)$$

а фазові зрушення гармонійних складові напруги  $U_{15}$  стосовно відповідних складових на виході суматора 12 визначається виразами:

$$\begin{aligned} \varphi_p &= \arctg \lambda_p Q \\ \varphi_c &= \arctg \lambda_c Q \end{aligned} \quad (14)$$

де  $\lambda_p = \frac{\omega_p}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_p}$  – відносна розстройка контуру на частоті  $\omega_p$ ;

$\lambda_c = \frac{\omega_c}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_c}$  – відносна розстройка контуру на частоті  $\omega_c$ .

Напруга  $U_{15}$  надходить на перший вхід блоку 7, на другий вхід якої по черзі впливають напруги від фільтра 10 та 21 через ключі 13 та 14, які періодично перемикаються вихідною напругою дільника 9 частоти з коефіцієнтом розподілу  $n_2$ . При замкнутому ключі 13 та розімкнутому ключі 14 вихідна напруга множини схеми 18 визначається добутком напруг:

$$U'_7 = k_n'' U_{15} U_{11}, \quad (15)$$

де  $k_n''$  – масштабний коефіцієнт перетворення множини схеми 18.

Складова резонансної частоти  $\omega_c - \omega_p = 2\Omega$  підсилюється виборчим підсилювачем 19, настроєним на подвоєне значення вихідний частоти дільника 8:

$$U'_{19} = \frac{k_n^2}{2} k_p' k_c k_c U_{m1}^2 U_{m8}^2 \cos(2\Omega t + 2\varphi_8 - \varphi_p). \quad (16)$$

При замкнутому ключі 14 та розімкнутому 13 вихідна напруга множини схеми 18 визначається добутком:

$$U'_7 = k_n'' U_{15} U_{21}. \quad (17)$$

Тоді вихідна напруга виборчого підсилювача 19 має вигляд

$$U'_{19} = \frac{k_n^2}{2} k_p' k_c k_c U_{m1}^2 U_{m8}^2 \cos(2\Omega t + 2\varphi_8 + \varphi_c). \quad (18)$$

При періодичній роботі ключів 13 та 14 із частотою  $\Omega_k = \frac{\Omega}{n_2}$  вихідна напруга виборчого підсилювача 19 складається з пакетів напруг частоти  $2\Omega$ , що детектується амплітудним детектором 20. Постійні складові продетектованих напруг виділяються фільтром 10 нижньої частоти й по черзі із частотою переключення ключів 13 та 14 впливають на вхід підсилювача 22 низької частоти з коефіцієнтом підсилення  $k_y$ .

Змінна складова напруг (16) та (18) підсилюється й з амплітудою

$$U_{22} = k_y \frac{U'_{19} - U''_{19}}{2} = \frac{k_y}{4} k_c k_p k'_n k''_n U_1^2 U_{m8}^2 (k'_p - k'_c) \quad (19)$$

випрямляється керованим із частотою комутації  $\Omega_k$  випрямлячем 23 і фіксується реєстратором 24.

При ненавантаженому датчику коефіцієнти передач резонансного контуру на бічних частотах  $\omega_p$  та  $\omega_c$  рівні  $(k'_p - k'_c)$ . Тому змінна складова напруги  $U_{22} = 0$ .

При контакті електродів 2-3 датчика з контрольованим матеріалом залежно від значення його об'ємної щільності відбувається розстройка резонансного контуру щодо частоти  $\omega$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{LC}} - \frac{1}{\sqrt{1(C + \Delta C)}} \quad (20)$$

де  $\Delta C$  – внесена контрольованим матеріалом ємність, яка пропорційна об'ємної щільності матеріалу  $\rho$ .

У випадку контакту електродів датчика з контрольованим матеріалом складова  $A\varepsilon_1$  з виразу (1) постійна і тоді цей вираз щодо збільшення ємності  $\Delta C$  від зміни об'ємної щільності контрольованого матеріалу  $\rho$  здобуває вид:

$$C(\rho) \approx A\varepsilon_2 \frac{e^{Bh} - q}{e^{Bh} + q} \quad (21)$$

З виразу (21) витікає, що при незмінній геометрії датчика, діелектричних властивостей навколишнього середовища ( $\varepsilon_3$ ) та постійній товщині контрольованого матеріалу ( $h$ ), збільшення ємності  $\Delta C$  пропорційно зміні об'ємної щільності  $\rho$  контрольованого матеріалу.

Ці збільшення  $\Delta C$  приводять до зсуву робочих точок на правої та лівої гілках резонансної кривої контуру. Коефіцієнт передачі контуру на частоті  $\omega_p$  збільшується до значення

$$k_p'' = \frac{Q''}{\sqrt{1 + \left( Q'' \frac{2(\Delta\omega - \delta\omega)}{\omega_0} \right)^2}} \quad (22)$$

а коефіцієнт передачі контуру на частоті  $\omega_c$  зменшиться до значення:

$$k_c'' = \frac{Q''}{\sqrt{1 + \left( Q'' \frac{2(\Delta\omega + \delta\omega)}{\omega_0} \right)^2}}, \quad (23)$$

де  $Q''$  – добротність контуру зі збільшенням додаткових втрат, що виникають у матеріалі 5.

При цьому виникає нерівність амплітуд ( $U'_{19} \neq U''_{19}$ ) пакетів напруг на вході підсилювача 22. Підсилювачем 22 підсилюється змінна складова із частотою переключення ключів 13 та 14, пропорційна різниці амплітуд високочастотних напруг  $\omega_p$  та  $\omega_c$  на виході резонансного контуру. Посилена напруга надходить на керований випрямляч 23 і фіксується реєстратором 24, шкала якого градується в одиницях об'ємної щільності.

### **Висновки**

На підставі проведеного аналізу існуючих дієлькометричних пристроїв контролю об'ємної щільності нетканих матеріалів та їх похибок вимірювання запропонована структурна схема пристрою, яка дозволяє підвищити точність вимірювання за рахунок виключення нестабільності двох незалежних генераторів. Наведене математичне обґрунтування підвищення точності вимірювання за рахунок збудження резонансного контуру одним генератором.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Ключев В. В. Приборы для не разрушающего контроля материалов и изделий Т. 1 / В. В. Ключев – М. : Машиностроение, 1985. – 285 с.
2. Ключев В. В. Приборы для не разрушающего контроля материалов и изделий Т. 2 / В. В. Ключев – М. : Машиностроение, 1985. – 351 с.
3. Бугров А. В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества / А. В. Бугров – М. : Машиностроение, 1982. – 94 с.
4. Матис И. Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля / И. Г. Матис – Рига : Зинтарис, 1982. – 302 с.
5. А.С. №1597343 СССР, МПК<sup>5</sup> G01R27/28. Устройство для измерения резонансной частоты электрической цепи / Ю. А. Скрипник, А. Н. Дыков, А. В.



Алексашин, Д. Н. Ахонченко, В. А. Фролов (СССР). – № 4456518; заявл. 7.07.88; опубл. 08.06.90.

6. А.С. №1784904 СССР, МПК<sup>5</sup> G01N27/22. Устройство для контроля объемной плотности диэлектрических материалов / Ю. А. Скрипник, А. Н. Дыков, Д. Н. Ахонченко (СССР). – № 4848313; заявл. 9.07.90; опубл. 01.09.92.

**Дроменко В. Б., Бондарская М. С., Ахонченко Д. Н.**

**Устройство для контроля объемной плотности диэлектрических материалов**

*Киевский национальный университет технологий и дизайна*

*В статье рассмотрены вопросы построения диэлькометрического устройства контроля объемной плотности нетканых материалов. Разработан метод повышения точности измерения объемной плотности. Предложена структурная схема устройства контроля объемной плотности нетканых материалов.*

**Ключевые слова:** *нетканые синтетические материалы, объемная плотность, устройство автоматического контроля, диэлькометрический датчик*

**Dromenko V. B., Bondarska M. S., Akhonchenko D. N.**

**Device for control of volumetric density of dielectric materials**

*Kyiv national university of technologies and design*

*In article considered a question of construction control dielcometric device of volume density of nonwoven materials. The developed method of increase accuracy of measurement. The request structural scheme control dielcometric device of volume density of nonwoven materials.*

**Keywords:** *non-woven synthetic material, bulk density, the automatic control sensor dielcometric*