

В.В. Брайловський, П.П. Ватаманюк, П.М. Шпатар  
**Реєстратор ємності параметричного конденсатора  
з системою ФАПЧ**

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,  
вул. Коцюбинського 2, м. Чернівці, 58000, Україна*

Реєстратор з системою ФАПЧ призначений для вимірювання змін ємності параметричного конденсатора резонансним методом. Досліджено основні параметри реєстратора, приведені теоретичні оцінки вольт-мікронної чутливості та схемотехнічна реалізація. Роздільна здатність вимірювання ємності 0,1 фФ.

**Ключові слова:** конденсатор, реєстратор ємності.

*Стаття поступила до редакції 27.08.2003; прийнята до друку 23.10.2003.*

## I. Вступ

Високочутливі ємнісні давачі широко застосовуються в різних фізичних дослідженнях [1,2]. Такого типу пристрої використовуються для вимірювання теплового розширення речовин, дослідження магнітострикційних і електрострикційних ефектів, в автоматичних вимірювальних системах [3]. Одним з найбільш чутливих приладів є дилатометр з ємнісним давачем переміщень [4,5]. При такому методі вимірювань реєструється зміна віддалі між пластинами плоского конденсатора, одна із обкладок якого зв'язана із зразком, а друга знаходиться в нерухомому стані. Це вимагає реєстрації ємності параметричного конденсатора з високою точністю, особливо для зразків з малим вимірюваним ефектом.

В роботі [6] описаний спосіб вимірювання ємностей на промисловому вимірювачі L-, C-, R-параметрів E7-12 за допомогою калібровочних конденсаторів, які представляють собою металізовані кварцові пластини. Перевагами таких конденсаторів є незмінність діелектричної постійної, відсутність анізотропії і термостабільність. Недоліком запропонованого в [6] методу вимірювання ємностей є складність виготовлення і калібрування набору таких конденсаторів.

Мостові методи вимірювання ємності досить трудомісткі, оскільки кожне вимірювання вимагає зрівноваження моста по активній і реактивній складовій, яке, як правило, проводиться вручну [7]. Для автоматизації процесу вимірювання необхідна порівняно велика кількість додаткового обладнання.

У даній роботі пропонується резонансний метод вимірювання ємності параметричного конденсатора,

особливістю якого є застосування прецизійної компенсаційної схеми фазової автоматичної піднастройки частоти (ФАПЧ). Система ФАПЧ є системою автоматичного регулювання (слідкуючою системою), частота настройки якої визначається частотою керуючого сигналу, а сигналом розузгодження є різниця фаз керуючого сигналу і сигналу зворотного зв'язку. У зв'язку з тим, що настройка здійснюється за різницею фаз, система є астатичною по відношенню до частоти: у встановленому режимі частота настройки точно рівна частоті керуючого сигналу. При певних умовах система ФАПЧ може бути астатичною і за фазою.

Поряд з основною властивістю автонастроювання, система ФАПЧ володіє властивістю фільтрації і веде себе, незалежно від функціонального призначення, як слідкуючий поліноміальний фільтр.

Нижче проводиться оцінка чутливості методу та розглянуто один з можливих варіантів схемотехнічної реалізації. Використання машинної обробки інформації забезпечує можливість аналізу динаміки зміни параметрів вимірювального конденсатора.

Основні функціональні вузли приладу зображені на рис. 1.

Параметричний ємнісний давач є складовою частиною коливального контуру генератора, керованого напругою. Початкова ємність давача може задаватися в межах від 50 пФ до 76 пФ. Конструктивні особливості вимірювального конденсатора наведені в [8]. Висока добротність контуру забезпечується використанням котушки індуктивності, виготовленої методом впалювання міді в циліндричну поверхню каркасу з

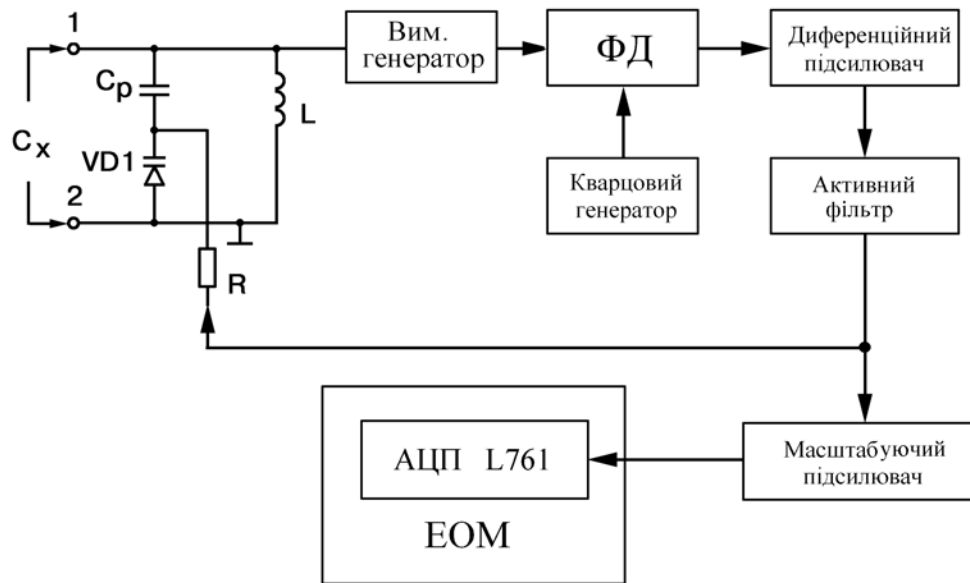


Рис. 1. Функціональна схема реєстратора ємності параметричного конденсатора.

високочастотної кераміки з наступним срібленням провідників. Величина індуктивності складає 1,8 мкГн.

Фазовий детектор, принципова схема якого зображена на рис. 2, відноситься до імпульсних, що вимагає перетворення вхідних сигналів у імпульсну форму. Тому аналоговий високочастотний сигнал керований напругою генератора перетворюється в прямокутні імпульси. Внаслідок того, що при будь-якому зсуві фаз застосований детектор формує сигнал з відповідним знаком, область захоплення частоти системою ФАПЧ є теоретично необмеженою.

Лінійна характеристика з постійним нахилом вихідної напруги від різниці фаз сприяє застосуванню даного фазового детектора як елементу контуру ФАПЧ із підвищеною заводостійкістю. Для різниці фаз вхідних сигналів  $\pm 360^\circ$  запропонована схема дає можливість отримати значення вихідної напруги  $\pm 12$  В. Використання активного фільтра другого порядку лінеаризує залежність вихідної напруги від різниці фаз, особливо при малих фазових відхиленнях, і збільшує коефіцієнт передачі за постійним струмом.

Опорний генератор з кварцовою стабілізацією частоти реалізований за типовою схемою [9] і

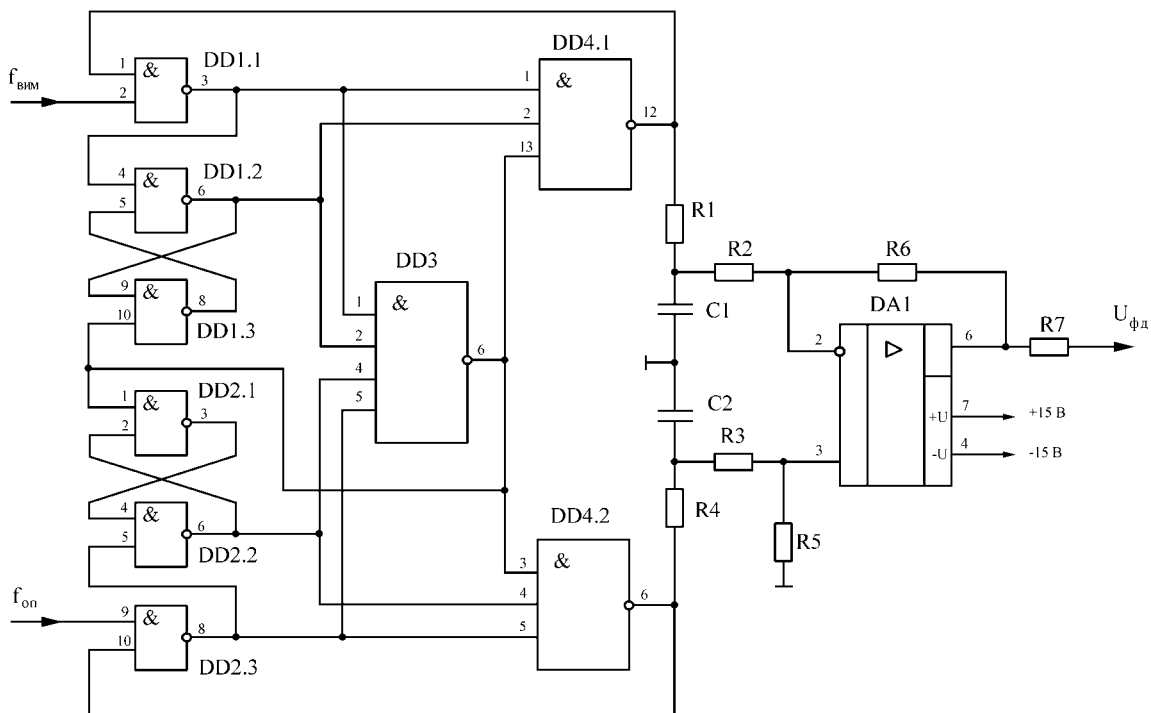


Рис. 2. Принципова схема фазового детектора.

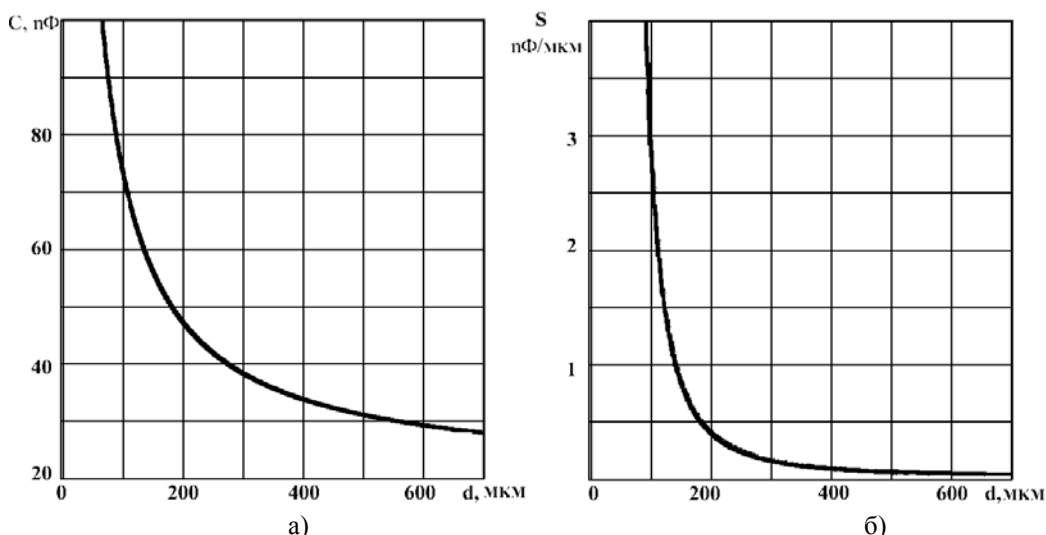


Рис. 3. Залежність ємності та чутливості параметричного конденсатора від віддалі між обкладками.

генерує прямокутні імпульси частотою 14,326 МГц, які подаються на один із входів імпульсного фазового детектора.

Розглянемо роботу приладу при проведенні, наприклад, дилатометричних вимірювань. Вимірювальний конденсатор під'єднується в коливальну систему вимірювального генератора, на виході якого отримується ВЧ- сигнал  $s(t) = U_0 \sin \omega t$ . Цей сигнал, перетворений в імпульсну форму, подається на один із входів фазового детектора, а на другий вхід подається сигнал від генератора опорної частоти. В залежності від різниці фаз між сигналами опорного і вимірювального генераторів, на виході детектора формується напруга відповідного знаку,

яка підсилюється і через активний фільтр другого порядку подається в коло компенсації зміни частоти вимірювального генератора.

Для компенсації зміни частоти генератора і, відповідно, зміни ємності параметричного конденсатора використовується варикап. Це дає можливість визначати ємність досліджуваного конденсатора, контролюючи величину напруги на компенсуючому варикапі.

Для автоматизації процесу вимірювань використовується ЕОМ з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) L761 [10]. Масштабуючий підсилювач необхідний для узгодження рівнів вхідних і вихідних напруг АЦП і реєстратора

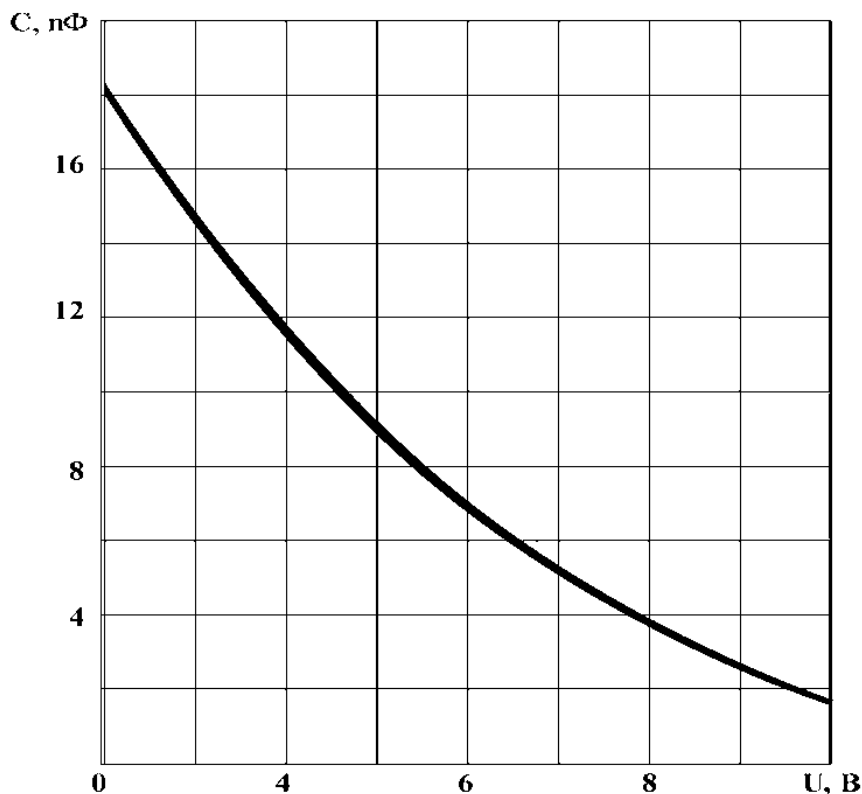


Рис. 4. Залежність ємності послідовної ланки варикап – конденсатор  $C_p$  від прикладеної до варикапу напруги.

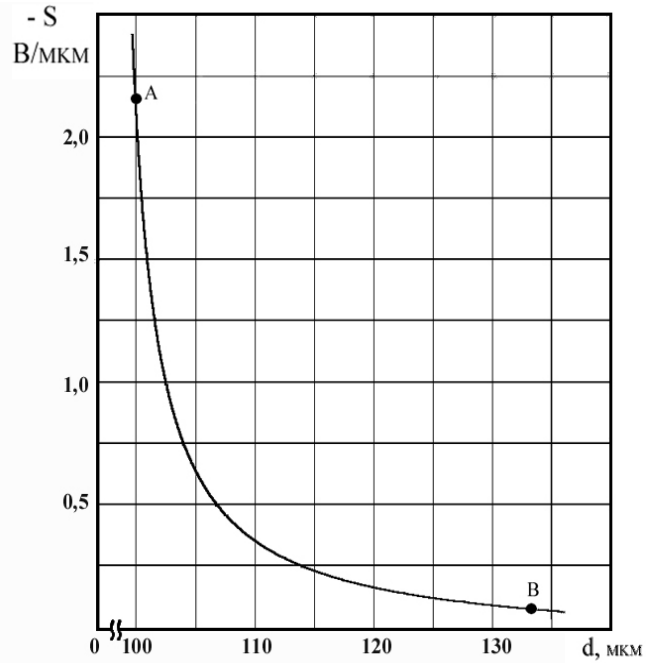
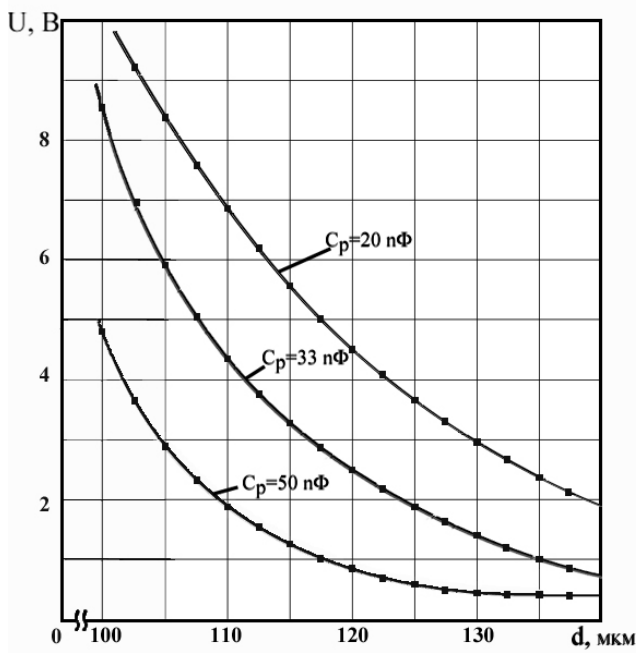


Рис. 5. Вольт-мікронна залежність та чутливість реєстратора ємності параметричного конденсатора.

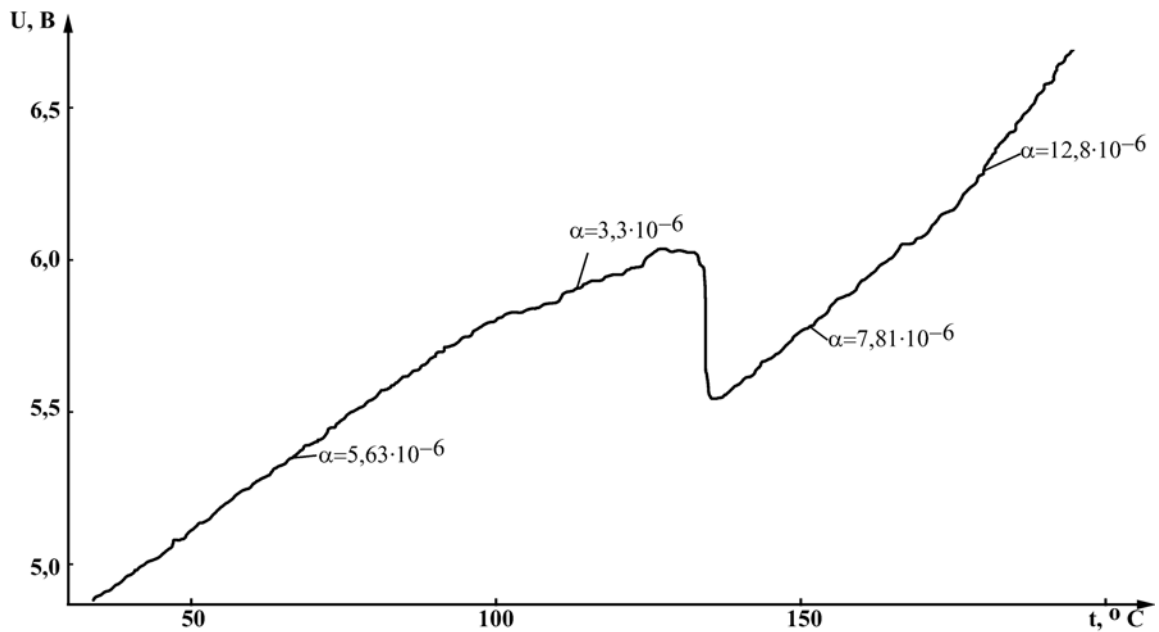


Рис. 6. Дослідження теплового розширення сполуки BaTiO<sub>3</sub>.

ємності. Програмне забезпечення реалізоване на мові програмування Delphi. Для обробки отриманої інформації застосовано відповідні математичні методи апроксимації, лінійного та нормованого усереднення.

Результати експериментальних досліджень

Розраховані залежності ємності  $C$  і чутливості  $S = \frac{\partial C}{\partial d}$  параметричного конденсатора від віддалі між обкладками зображені на рис. 3 а, б.

Для лінеаризації вольт-фарадної характеристики компенсуючої ланки коливального контуру, послідовно з варикапом ввімкнено конденсатор  $C_p$  ємністю 20 пФ. Графік залежності ємності послідовно з'єднаних варикапа KB110A і конденсатора  $C_p$  від напруги на варикапі зображений на рис. 4.

Як видно з графіка, зміни напруги на варикапі на 10 В відповідає зміна ємності послідовного кола варикап-конденсатор на 16 пФ. Це дозволяє

реєструвати зміну ємності в 0,01 фФ.

Для середньої чутливості ( $S_{-1,5}^{\frac{\text{пФ}}{\text{мкм}}}$ ) і реально вимірюваної зміни ємності ( $\Delta C = 0,01$  фФ), отримуємо мінімальну зміну віддалі між обкладинками, яку можна зареєструвати запропонованою системою з ФАПЧ:

$$\Delta d_{\min} = \Delta C \left( \frac{\partial C}{\partial d} \right)^{-1} = 6 \cdot 10^{-12} \text{ м}.$$

Теоретична оцінка чутливості до переміщень одного порядку з результатами, отриманими в роботах [4,5]. При малих віддаль між обкладинками вимірювального конденсатора зростає вплив механічних вібрацій на величину його ємності. Із-за цього на практиці надійно реєструється зміна ємності 0,1 фФ, що на порядок менше розрахованої теоретично.

Вимірюючи напругу, яка подається в коло компенсуючої ланки, можна визначити зміну ємності параметричного конденсатора і, використовуючи графік залежності ємності від віддалі між обкладинками (рис. 3 а), – переміщення. Експериментально визначена вольт-мікронна залежність та чутливість реєстратора зображені на рис. 5 а, б.

Таким чином зміні віддалі між обкладинками відповідає зміна напруги на виході реєструючої системи. Величина чутливості залежить від початкової ємності (початкової віддалі між обкладинками) параметричного конденсатора.

## II. Висновки

Показана можливість використання системи ФАПЧ для реєстрації ємності параметричного конденсатора. Досліджено основні параметри реєстратора та фактори, які суттєво впливають на чутливість системи. Калібрування пристрою здійснюється за методикою, запропонованою в роботі [5]. Отримані результати свідчать про те, що параметричні ємнісні давачі із використанням системи ФАПЧ володіють високою чутливістю, яку можна підвищити застосуванням вібростійких систем та додаткового екранування.

Реєстратор ємності параметричного конденсатора використовувався для дослідження теплового розширення алюмінію, міді, ВаТіО<sub>3</sub>. При цьому спостерігалось співпадання результатів вимірювання з літературними даними.

В сполуці ВаТіО<sub>3</sub> при температурі 128°C (рис. 6) зареєстровано фазовий перехід, наявність якого було також підтверджено за допомогою калориметричної установки [11]. Температурний коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha$  визначається по вихідній напрузі реєстратора ємності після відповідної математичної обробки даних програмними засобами.

- [1] А.М. Толкачев, В.А. Тиц, Б.Г. Удовидченко, Е.А. Кирьянова. Дилатометр для малорасширяющихся материалов // *Измерительная техника*, **2**, сс. 37-38 (1991).
- [2] С.М. Бармин, С.В. Кортов, А.А. Севастьянов, О.П. Шепатковский. Емкостной дилатометр для ленточных образцов // *Измерительная техника*, **2**, сс. 38-39 (1991).
- [3] В.П. Бухгольц, Э.Г. Тисевич. *Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления*. М., Энергия, вып. 464, 78 с. (1972).
- [4] F. Kromer. Dilatometrische Untersuchungen an den Schwere-Fermionen-Verbindungen (UTh)Be<sub>13</sub> und CeNi<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>: Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doctor rerum naturalium.- Dresden, (2000).
- [5] C. Köckert. Thermische Ausdehnung und Langzeit-Längenrelaxation der Systeme NbTi und NbTi-D im Tieftemperaturbereich: Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doctor rerum naturalium.- Dresden, (2001).
- [6] Ю.Ф. Андреев, В.С. Рахманинов. // *Электронная техника, Сер.2: Полупроводниковые приборы*, вып. 4(201), с. 49, (1989).
- [7] И.Б. Пузин, А.И. Хорунжий. Автоматический построитель вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур (С-V-характериограф) // *ПТЭ*, **3**, сс. 223-227 (1988).
- [8] М.Г. Бзовий, В.В. Брайловський, Л.Ф. Політанський, П.М. Шпатар. Конструктивні похибки параметричних ємнісних давачів // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка", Електроніка*, **455**, сс. 51-55 (2002).
- [9] В.С. Гутников. *Интегральная электроника в измерительных устройствах*. Л.: Энергоатомиздат, 304 с. (1988).
- [10] Платы L-761, L-780 и L-783. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЗАО "Л-кард" (<http://www.lcard.ru>), 104 с. (1999).
- [11] В.В. Брайловський, Г.І. Ластівка, М.М. Чуботару, П.М. Шпатар. Диференційний калориметр // *Третя міжнародна науково-технічна конференція "Современные информационные и электронные технологии"*, Одеса, 139 с. (2002).

В.В. Брайловський, П.П. Ватаманюк, П.М. Шпатар

V.V. Brailovsky, P.P. Vatamanjuk, P.M. Shpatar

## **Registor of Capacity of the Parametrical Capacitor with System PLL**

*Chernivtsy National University, Radio Engineering dept.,  
2, Kotsubynskyy Str., Chernivtsi, 58000, Ukraine*

The registor with system PLL is intended for measurement of capacity of the parametrical capacitor by a resonance method. The basic parameters of the registor, theoretical estimations and circuit realization are investigated. Sensitivity of measurement of capacity is 0.1 fF.