

## ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ БИОИМПЕДАНСА С АДАПТИВНЫМ ВЫБОРОМ СЕТКИ ЧАСТОТ

*Мосійчук В. С., к.т.н.; Тимошенко Г. В., аспірант;  
Шарпан О. Б. д.т.н., проф.*

*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», Київ, Україна, [mosv@ros.kpi.ua](mailto:mosv@ros.kpi.ua)*

## WIDEBAND BIOIMPEDANCE METER WITH THE ADAPTIVE SELECTION OF FREQUENCY GRID

*Mosiychuk V. S., Timoshenko G. V., Sharpan O. B.*

*National Technical University of Ukraine, Kyiv Politechnic Institute, Kiev, Ukraine*

### Введение

Существующая серийная аппаратура измерителей биоимпеданса не удовлетворяет современным требованиям по широкополосности, точности представления амплитудно- и фазочастотной характеристик и быстродействию [1]. Вследствие этого может возникнуть пропуск неоднородностей, влияние которых выражается в изменении формы частотных характеристик [2]. Также на пропуск неоднородностей влияет количество измерительных частот (в существующей аппаратуре используется 3...5, в единичных случаях больше [3]), что недостаточно для выявления в исследуемом объекте слабо выраженных неоднородностей или анализа сложных объектов. В случае диагностики функционального состояния биообъектов с быстро меняющимися параметрами необходимо уменьшать время измерения на всех частотах до 10-30 мс, в то время как возможности существующей аппаратура ограничиваются единицами-десятками секунд.

**Целью работы** является обоснование структуры и определение характеристик быстродействующего широкополосного измерителя полного импеданса биологических объектов с возможностью адаптивного выбора сетки измерительных частот в расширенной полосе.

### Структурная схема измерителя полного импеданса

Разработанный прибор предназначен для измерения полного импеданса исследуемого объекта (ИО) по четырёхэлектродной методике.

За основу структурной схемы прибора (рис. 1) выбран аналог [4] с использованием активных электродов (АЭ) E1 и E2 [5], при помощи которых исследуемый объект подключается к измерителю. Это позволяет расположить в непосредственной близости к измерительным электродам входные буферные усилители с малой входной ёмкостью и применить в качестве опорного сигнала падение напряжение на шунте, по которому ток стекает с

ИО. Конструкция активных электродов [5] была доработана за счет переноса в активные электроды также и источника тока, управляемого напряжением. Это позволило проводить измерения на существенно более высоких частотах – максимальная измерительная частота прибора составляет 5 МГц и ограничена лишь тактовой частотой цифрового синтезатора частоты (ЦСЧ) [6]. С выхода синтезатора частоты напряжение подаётся на активный электрод АЭ1, в котором расположен источник тока, управляемый напряжением. Модуль импеданса ИО измеряется как отношение модуля разности потенциалов между электродами E1(П) и E2(П) к модулю тока, протекающего через ИО. Фаза импеданса определяется путем измерения разности фаз между падением напряжения на исследуемом объекте (между электродами E1(П) и E2(П)) и падением напряжения на опорном резисторе  $R_{ш}$ , которое совпадает с фазой тока через объект.

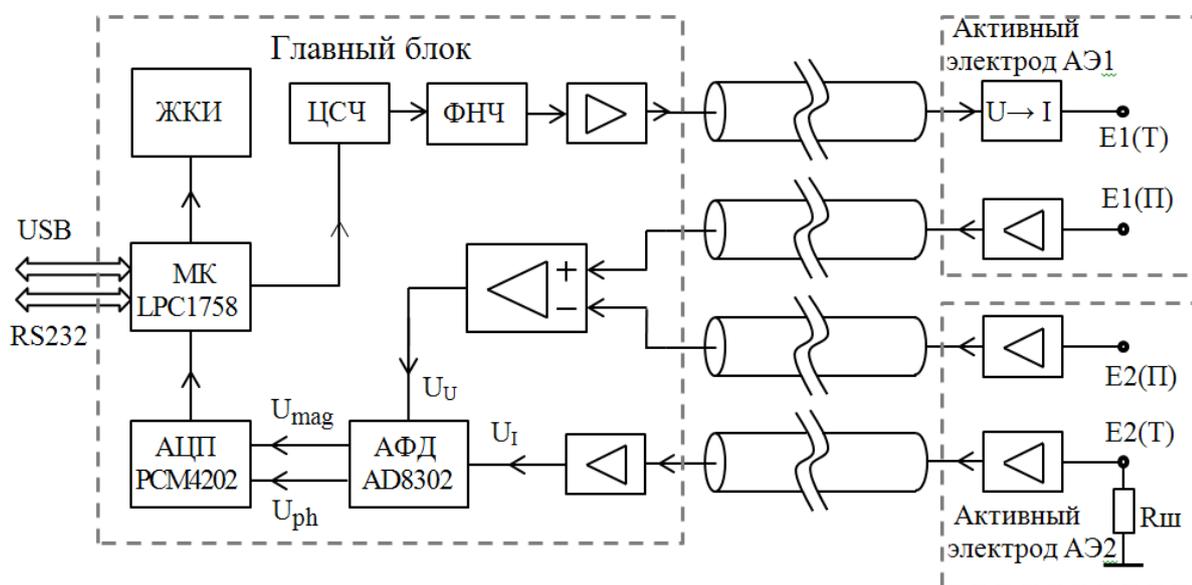


Рис. 1 — Структурная схема измерителя импеданса

Из-за чрезвычайно широкого диапазона измерительных частот, для получения высокой точности измерения в приборе реализован режим калибровки с использованием большого количества калибровочных данных. Калибровка заключается в измерении параметров импеданса разных двухполюсников, составленных из прецизионных резисторов и емкостей с точно известными номиналами. Количество двухполюсников для проведения калибровки зависит от необходимой точности измерения параметров импеданса ИО в выбранном диапазоне частот и может задаваться программно.

С целью повышения быстродействия измерения частотных параметров импеданса использовано предложенный в [7] адаптивный выбор количества измерительных частот с учетом оценки крутизны частотной характеристики импеданса. На пологих участках ЧХ шаг частот увеличивается, на крутых – уменьшается. Это позволяет выбирать минимально необходимое количество измерительных частот и, следовательно, уменьшить время из-

мерення, с сохранением высокой точности отображения нелинейностей на ЧХ.

### Проверка характеристик прибора

Для проверки характеристик прибора и качества процедуры калибровки проведены измерения ЧХ импеданса тестового объекта — RC-цепочки из 5-и прецизионных резисторов и конденсаторов, параметры которых были предварительно измерены лабораторным измерителем индуктивности, ёмкости и сопротивления E7-12. На рис. 2 и 3 приведены измеренные и расчетные АЧХ и ФЧХ тестовой цепочки, а также зависимость погрешности измерения разработанного прибора от частоты.

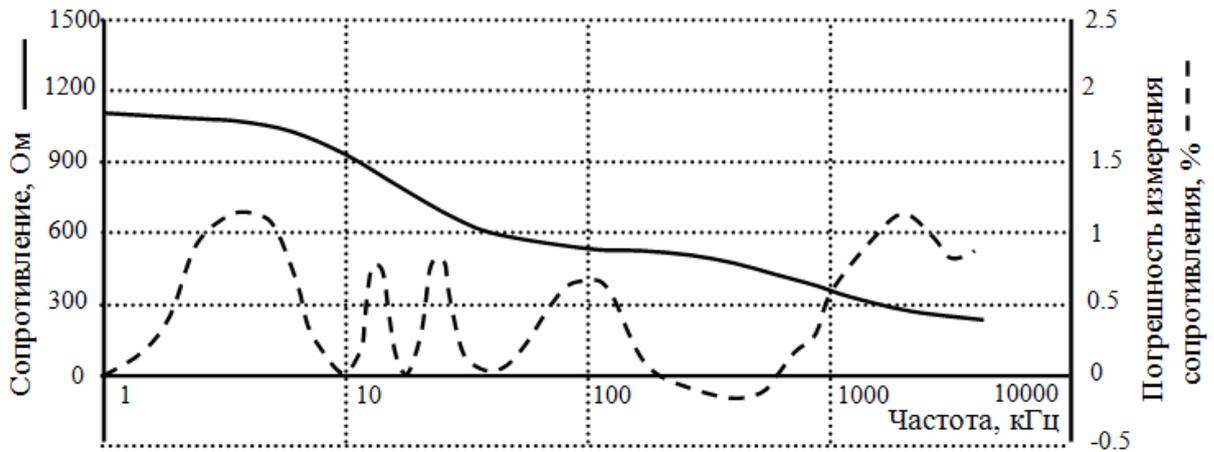


Рис. 2 — АЧХ тестовой RC-цепочки

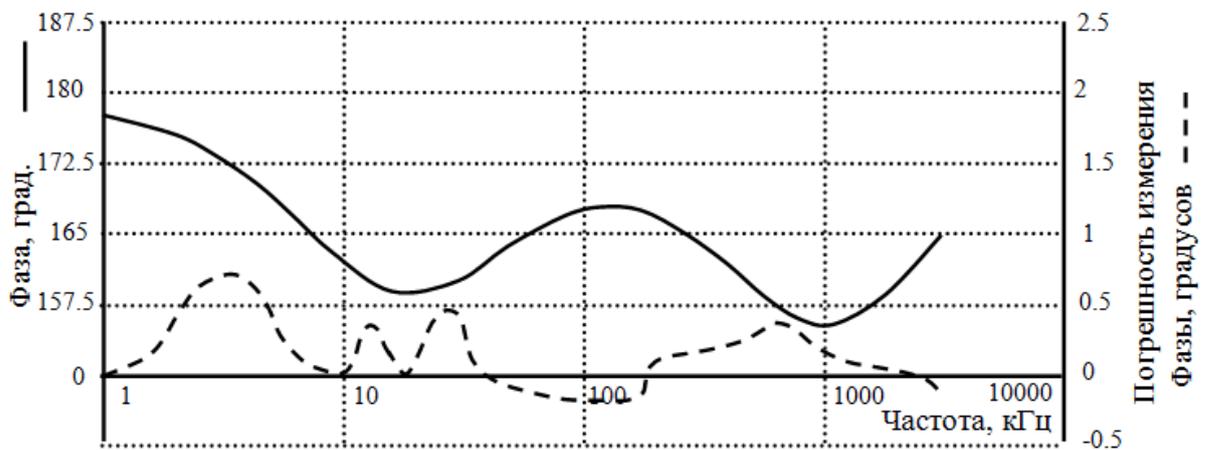


Рис. 3 — ФЧХ тестовой RC-цепочки

Как видно из приведённых графиков, погрешность измерения ЧХ на некоторых частотах близка к нулю, как для модуля, так и для фазы импеданса. Это частоты, на которых измерялись характеристики калибровочных нагрузок. Значения погрешностей можно уменьшить, оптимизировав алгоритм корректировки. Например, целесообразно учитывать априорную информацию о схемах калибровочных нагрузок и ориентировочную экви-

валентную схему исследуемого биологического объекта. На частотах выше 50 кГц частотные зависимости погрешностей измерения параметров тестовой цепочки не коррелируют между собой, что связано с заметным влиянием паразитных параметров элементов на высоких частотах. Максимальная относительная погрешность измерения модуля импеданса данной тестовой нагрузки составляет 3.7%, фазы – 1.4 градуса.

По результатам проверки прибора на разных тестовых нагрузках основные его технические характеристики обобщены в таблице 1.

Табл. 1. Основные технические характеристики измерителя импеданса

Параметр	Значение
Диапазон модуля измеряемого импеданса	0...1000 Ом
Разрешающая способность измерения модуля импеданса	1 Ом
Максимальная погрешность измерения модуля импеданса	5 %
Диапазон фазы измеряемого импеданса	-90...0 градусов
Разрешающая способность измерения фазы импеданса	0.1 градус
Максимальная погрешность измерения фазы импеданса	2 градуса
Диапазон измерительных частот	1...5000 кГц
Амплитуда измерительного тока	≤ 1 мА
Количество измерительных частот	принципиально не ограничено

### **Выводы**

Разработанный прибор позволяет с высокой точностью определять частотные характеристики импеданса исследуемого объекта в расширенном диапазоне частот от 1 кГц до 5 МГц. Благодаря применению цифрового синтезатора частоты и активных электродов, прибор не имеет ограничений на количество измерительных частот, что позволяет точно определять частотные характеристики импеданса в широком диапазоне частот. Точность измерения модуля импеданса составляет не более 5%, а фазы не более 2-х градусов. Благодаря применению в приборе алгоритма адаптивного выбора сетки частот удалось достичь общей минимизации времени проведения измерения.

### **Перечень источников**

1. Николаев Д. В. Биоимпедансный анализ состава тела человека / Д. В. Николаев, А. В. Смирнов, И. Г. Бобринская, С. Г. Руднев. – М. : Наука, 2009. – 392 с. – ISBN 978-5-02-036696-1 (в пер.).
2. Abdur Rub Abdur Rahman A Detailed Model for High-Frequency Impedance Characterization of Ovarian Cancer Epithelial Cell Layer Using ECIS Electrodes / Abdur Rub Abdur Rahman, Chun-Min Lo, Shekhar Bhansali // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2009. – Vol. 56, Is. 2. – pp. 485 - 492
3. ImpediMed : SFB7 for Body Composition [Электронный ресурс] / ImpediMed – Режим доступа: <http://www.impedimed.com/products/sfb7-for-body-composition/>. – Название с экрана.
4. Yuxiang Yang Design and preliminary evaluation of a portable device for the meas-

urement of bioimpedance spectroscopy / Yuxiang Yang, Jue Wang, Gang Yu., Feilong Niu, Ping He // *Physiol. Meas.* – 2006. – Vol. 27. – 1293-1310.

5. Шарпан О. Мікропроцесорний монітор комплексного електричного біоімпедансу / О. Шарпан, О. Зудов, Н. Магльована, О. Павлов, В. Сінанов // Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці ; труди 5-ї міжн. наук. техн. конф. – Львів – 1999. – с. 192-193.

6. Venceslav F. Kroupa *Phase Lock Loops and Frequency Synthesis*. – 1'st edition. – C. : John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 334 p. – ISBN 0-470-84866-9.

7. Тимошенко Г.В. Выбор количества частот для электроимпедансометрии биологических объектов в реальном времени / Г.В. Тимошенко // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2013. – № 55. – с. 118-127.

### References

1. Nikolaev D.V., Smirnov A.V., Bobrinskaja I.G., Rudnev S.G. (2009) *Bioimpedansnyj analiz sostava tela cheloveka* [Bioimpedance analysis of the human body]. Moscow, Nauka Publ., 392 p.

2. Abdur Rub Abdur Rahman, Chun-Min Lo, Shekhar Bhansali (2009) A Detailed Model for High-Frequency Impedance Characterization of Ovarian Cancer Epithelial Cell Layer Using ECIS Electrodes. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. Vol. 56, No. 2. pp. 485 - 492

3. *ImpediMed : SFB7 for Body Composition*. – Available at: <http://www.impedimed.com/products/sfb7-for-body-composition/>.

4. Yuxiang Yang, Jue Wang, Gang Yu., Feilong Niu, Ping He (2006.) Design and preliminary evaluation of a portable device for the measurement of bioimpedance spectroscopy. *Physiol. Meas.* Vol. 27, pp. 1293-1310.

5. Шарпан О., Зудов О., Магльована Н., Павлов О., Сінанов В. (1999) Мікропроцесорний монітор комплексного електричного біоімпедансу [Microprocessor monitor of complex electrical bioimpedance]. *Dosvid rozrobki i zastosovannja SAPR v mikroelektronici* [Experience in the development and application of CAD systems in microelectronics]. L'viv: pp. 192 - 193.

6. Kroupa V. F. (2003) *Phase Lock Loops and Frequency Synthesis*. John Wiley & Sons Ltd, 334 p. – ISBN 0-470-84866-9.

7. Timoshenko, G. V. (2013) Selecting the number of frequencies for real time electroimpedancemetry of biological objects. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparatabuduv.*, no. 55, pp. 118-127. (in Russian)

*Мосійчук В. С., Тимошенко Г. В., Шарпан О. Б. Широкопasmовий вимірювач біоімпедансу з адаптивним вибором сітки частот. Для діагностики функціонального стану і структури біооб'єктів з слабо вираженими неоднорідностями важливо швидко та точно визначити амплітудно- і фазочастотну характеристики. Для забезпечення цього в приладі використовується синтезатор частоти, амплітудно-фазовий детектор в інтегральному виконанні, а також активні електроди, за допомогою яких джерело струму і вхідні буферні підсилювачі з малою вхідною ємністю розташовуються в безпосередній близькості до досліджуваного біооб'єкту. Це дозволяє проводити вимірювання на частотах до 5 МГц з похибкою вимірювання не більше 5 % по модулю імпедансу і не більше 2-х градусів за фазою.*

**Ключові слова:** вимірювач імпедансу; функціональний стан; сітка частот; вимірювання в широкій смузі частот; АЧХ; ФЧХ.

Мосийчук В. С., Тимошенко Г. В., Шарпан О. Б. **Широкополосный измеритель биоимпеданса с адаптивным выбором сетки частот.** Для диагностики функционального состояния и структуры биообъектов с слабо выраженными неоднородностями важно быстро и точно определять амплитудно- и фазочастотную характеристики. Для обеспечения этого в приборе используется синтезатор частоты, амплитудно-фазовый детектор в интегральном исполнении, а также активные электроды, с помощью которых источник тока управляемый напряжением и входные буферные усилители с малой входной ёмкостью располагаются в непосредственной близости к исследуемому биообъекту. Такие решения позволили производить измерения на частотах до 5 МГц с погрешностью не более 5% по модулю импеданса и не более 2-х градусов – по фазе.

**Ключевые слова:** измеритель импеданса; функциональное состояние; сетка частот; измерения в широкой полосе частот; АЧХ; ФЧХ.

Mosiychuk V. S., Timoshenko G. V., Sharpan O. B. *Wideband bioimpedance meter with the adaptive selection of frequency grid.*

*Introduction.* For the diagnosis of functional state and structure of biological objects with weakly expressed irregularities it is important quickly and accurately to determine the amplitude- and phase-frequency characteristics. Therefore, the purpose of the article is a representation of the results of the development of biological objects high-speed impedance meter with the ability to select adaptive grid measuring frequencies in the extended band.

*Structure of the impedance meter.* Developed instrument is designed to measure the impedance of the object on four-electrode method. The device uses a frequency synthesizer amplitude-phase detector integrally fabricated and active electrodes, by which the voltage controlled current source and the input buffer amplifiers with low input capacitance, are located in close proximity to the studied bioobject. This allowed to make measurements at frequencies up to 5 MHz.

*Instruments characteristics.* To test the device characteristics the frequency characteristics of the test object (RC-chain) impedance were measured. It is composed of 5 precision resistors and capacitors. Parameters of the elements were measured preliminarily by laboratory inductance, capacitance and resistance meter E7-12. The dependence of the measurement errors of the developed device in the frequency range from 1 kHz to 5 MHz is not more than 5% of the modulus of the impedance and not more than 2° of the phase.

**Keywords:** bioimpedance meter, functional state, frequency grid, wideband measurements; biomedical device, frequency response, phase response.