

УДК 621.372.54.061

*П. А. Ушаков, доктор технических наук, профессор;**К. О. Максимов, старший преподаватель;**А. В. Тарасов, аспирант*

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНЫХ СРЕД

Рассмотрены методика и комплекс измерительных средств для параметрической идентификации RC-элементов с распределенными параметрами, необходимой для создания точных математических моделей, для совершенствования технологии изготовления элементов и дальнейшего продвижения новой элементной базы на рынок электронных компонентов. Разработана измерительная система, обеспечивающая оперативное диагностирование и количественную оценку параметров любых образцов RC-элементов с распределенными параметрами в автоматическом режиме.

Ключевые слова: RC-элемент с распределенными параметрами, фрактальный элемент, диагностическая измерительная система, идентификация параметров пленочных структур

Многослойные пленочные резистивно-емкостные среды в настоящее время являются конструктивной основой для создания нового класса пассивных электронных компонентов, которые имеют фрактальный импеданс (фрактальные элементы) [1]. Такие элементы, в частности, необходимы для аналогового моделирования динамических систем, описываемых дифференциальными уравнениями дробного порядка, для построения ПИД-регуляторов дробного порядка, для выполнения операций интегрирования дробного порядка в режиме реального времени [2].

Созданная в работах [3, 4] теория анализа и синтеза RC-элементов с распределенными параметрами (RC-ЭРП) позволяет разрабатывать конструкции RC-ЭРП по заданным частотным характеристикам (ЧХ) входного импеданса, которые можно изготовить с помощью известных технологий микросхем [5].

Однако конструктивные особенности многослойных RC-ЭРП не позволяют использовать методики измерения, разработанные для обычных R- и C-элементов с сосредоточенными параметрами. В частности, невозможно оценить распределенные потери в многослойной структуре, распределенную емкость, паразитные параметры, возникающие из-за неточности совмещения слоев и т. п.

В данной работе предлагаются методика и комплекс измерительных средств для параметрической идентификации параметров RC-ЭРП, необходимой для создания точных математических моделей RC-ЭРП, для совершенствования технологии изготовления элементов и дальнейшего продвижения новой элементной базы на рынок электронных компонентов.

В связи с этим была разработана система, обеспечивающая оперативное диагностирование и количественную оценку параметров любых образцов RC-

ЭРП в автоматическом режиме. На рис. 1 представлена упрощенная функциональная схема данной системы применительно к идентификации параметров толстопленочных RC-ЭРП со структурой слоев вида «резистивный слой 1-диэлектрик-резистивный слой 2» (R-C-NR).

Диагностико-измерительная система (ДИС) состоит из трех основных частей.

1. Управляющая ЭВМ с архитектурой IBM PC с разработанным специализированным программным обеспечением (ПО) в среде Agilent VEE Pro 8.0 с математическим ядром MATLAB в соответствии с ТИВН.668710.031РП. Основные задачи ЭВМ: выполнение в соответствии с ПО алгоритма калибровки/настройки всех элементов измерительной системы; проверка системы на наличие ошибок/неисправностей; реализация алгоритма измерения параметров RC-ЭРП; завершение измерений с формированием протокола результатов испытаний. Кроме того, ЭВМ посредством созданного графического пользовательского интерфейса (ГПИ) выполняет непрерывное динамическое отображение графической/аналитической информации и позволяет оператору обращаться к накопленным данным, исполнительным файлам и иной служебной информации.

2. Измерительный комплекс параметров интегральных микросхем (ИМС) «ДМТ-219», представляющий совокупность измерительных приборов, связанных схемотехнически в единое универсальное средство измерения различных электрофизических параметров.

В таблице приведен перечень устройств и приборов комплекса «ДМТ-219», используемых при измерениях толстопленочных RC-ЭРП.

Все приборы комплекса управляются программно посредством ЭВМ через различные интерфейсы: VXI, GPIB, USB, RS-232 (см. рис. 1).

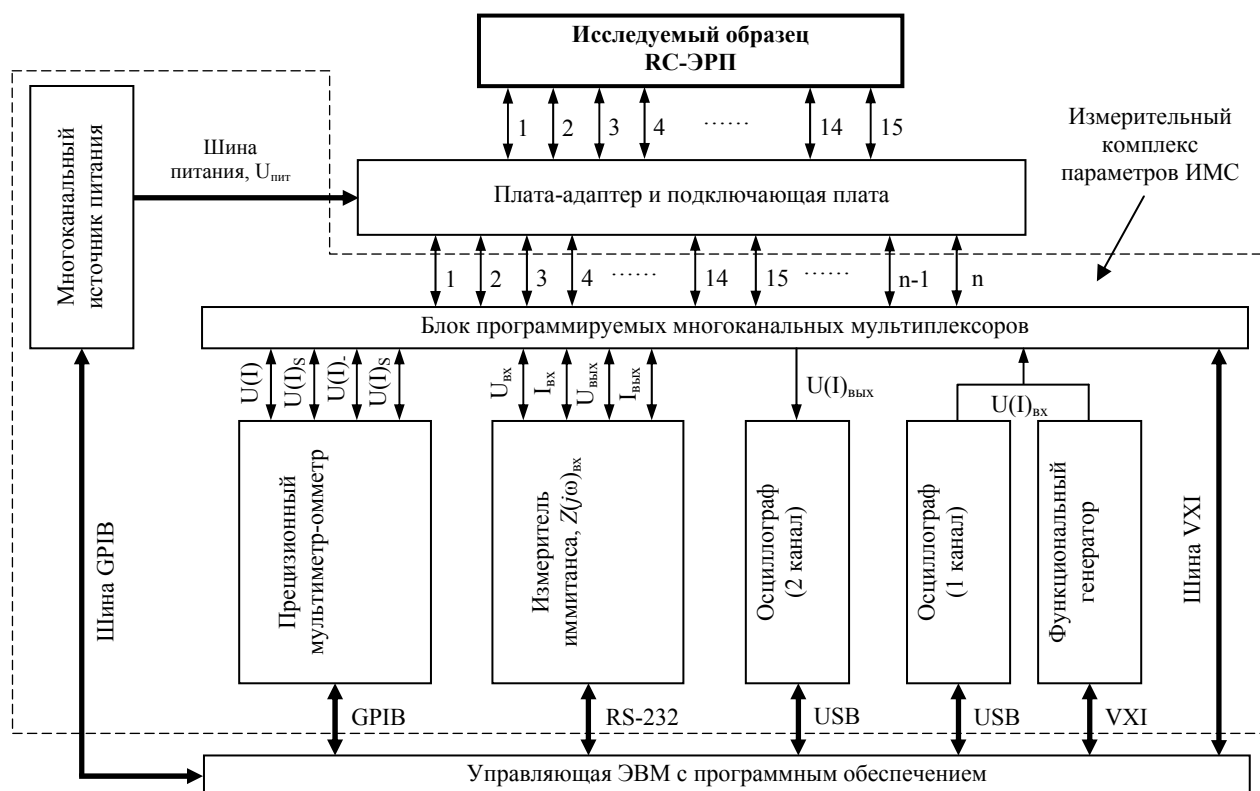


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема диагностико-измерительной системы электрофизических параметров RC-ЭРП

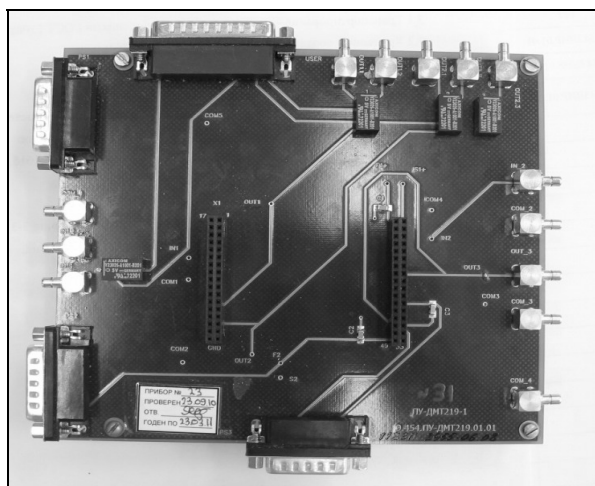
Состав оборудования измерительного комплекса «ДМТ-219»

№ п/п	Обозначение	Наименование и характеристика	Кол-во
1	ZT532VXI	Четырехканальный генератор сигналов произвольной формы с частотой генерирования до 80 МГц	1
2	Agilent E1472A	Шесть четырехканальных ВЧ-мультиплексоров с полосой пропускания до 16 ГГц	2
3	Agilent MSO6104A	Осциллограф четырехканальный с 16-канальным логическим анализатором. Полоса пропускания – 1 ГГц. Наличие математических функций анализа	1
4	Agilent 34411A	Прецизионный многофункциональный цифровой мультиметр. Разрядность – 7, возможность четырехпроводных измерений и измерение сопротивления: $1 \dots 10^9$ Ом	1
5	E7-20	Измеритель иммитанса в комплекте с измерительными щупами. Частота измерений до 1 МГц	1
6	Agilent N6710B	Четырехканальный источник питания постоянного тока. Мощность – 300 Вт, напряжение до 50 В, ток до 10 А	1

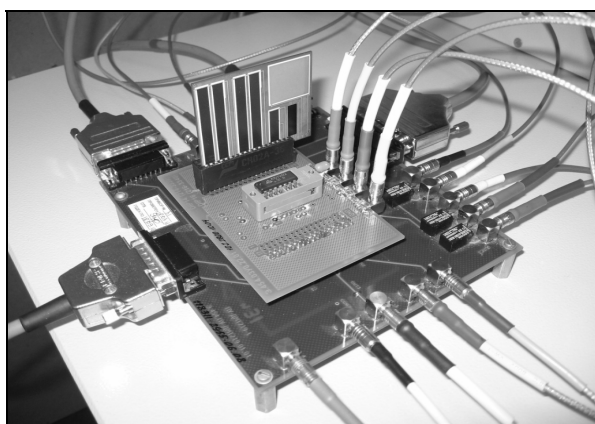
3. Плата-адаптер и подключающая плата представляют собой конструктивно завершенное устройство, предназначенное для: обеспечения корректной коммутации задающих/измерительных каналов комплекса «ДМТ-219»; обеспечения корректного функционирования исследуемого RC-ЭРП исходя из выбранной схемы подключения внешних выводов; обеспечения цепей компенсации/согласования и защиты, если они требуются. На рис. 2 приведены изображения платы адаптера и подключающей платы для измерения параметров указанной толсто пленочной структуры. На плату-адаптер выносятся те части электрической принципиальной схемы, которые являются общими при измерении параметров любых RC-ЭРП, а также большинство силовых цепей (например, для питания операционного усилителя). На подключающей плате располагают узлы и элементы, зависящие от схемы подключения выводов RC-ЭРП, а также все чувствительные к ЭМИ/помехам цепи.

Такое конструктивное решение выгодно с той точки зрения, что при испытаниях другого типа RC-ЭРП необходимо будет разрабатывать только подключающую плату, оставляя ту же самую плату-адаптер.

Для функционирования ДИС в соответствии с поставленными задачами были разработаны методики измерения требуемых параметров и реализованы в виде программного модуля, управляющего приборами и ресурсами комплекса «ДМТ-219».



а



б

Рис. 2. Фотоизображение: а – платы-адаптера; б – подключенных к измерительной системе платы-адаптера, подключающей платы и исследуемого толстопленочного R-C-NR ЭРП

Программный модуль обеспечивает выполнение следующих функций:

- 1) полная автоматизация измерительных процедур, что позволяет исключить ошибки оператора и значительно ускорить метрологические операции;
- 2) динамическое отображение графической и аналитической информации, а также контроль процесса измерения посредством ГПИ;
- 3) расчет показателей по массиву измерений, если это необходимо;
- 4) формирование и заполнение бланка отчета в различных форматах (.xls, .txt, .doc и др.) на основе массивов измерений, рассчитанных показателей и служебной информации как по отдельно взятому RC-ЭРП, так и по партии RC-ЭРП.

Методика испытания заключается в последовательном измерении ряда параметров в соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 3.

На рисунке: Δf – диапазон частот, на котором проводятся измерения y -параметров; N – количество точек измерения на выбранном частотном диапазоне; N_1 – количество измеряемых RC-ЭРП на одной подложке; y_{ij} – измеряемые для каждого RC-ЭРП y -параметры (не менее двух).

Детальный алгоритм, ограниченный точками (1), (2) и (3) на рис. 3, представлен на рис. 4. Рассмотрим его подробнее.

Известно, что любая измерительная система не идеальна и характеризуется погрешностями измерений (приборные, систематические, случайные и пр.), которые необходимо вычислять, контролировать и учитывать в результатах.

Измерения статических параметров RC-ЭРП и контрольных элементов подложки (сопротивления, емкости) характеризуются малыми погрешностями, поэтому использование прецизионного мультиметра-омметра, измерителя иммитанса и 4-проводной компенсационной схемы измерения достаточно для адекватной оценки/контроля погрешностей измерений.

Наиболее помехочувствительными являются динамические измерения параметров RC-ЭРП – ЧХ y -параметров (входного импеданса $Z_{вх}(j\omega)$). В связи с этим был реализован двухступенчатый алгоритм: 1) основные измерения с применением графического метода по осциллограммам и 2) контрольные измерения вещественной и мнимой составляющих $Z_{вх}(j\omega)$.

При основных измерениях используются два синхронизированных канала осциллографа, подключенных ко входу и выходу RC-ЭРП и функциональный генератор. С генератора на вход RC-ЭРП последовательно подается N эталонных гармоник $f_{вх1}(t), f_{вх2}(t), f_{вх3}(t), \dots, f_{вхN}(t)$ в диапазоне частот Δf с шагом в логарифмическом масштабе. Для каждой гармоники на каналах осциллографа отображаются входной сигнал и отклик RC-ЭРП, смещенный относительно входного воздействия на величину Δt_i и имеющий некоторую амплитуду $F_{вхi}(t)$. На основе массивов измеренных значений $[F_{вх1}(t), F_{вх2}(t), \dots, F_{вхN}(t)]$ и $[2\pi\Delta t_1/T, 2\pi\Delta t_2/T, \dots, 2\pi\Delta t_N/T]$ строятся АЧХ – $|Z_{вх}(j\omega)|$ и ФЧХ – $\varphi(Z_{вх}(j\omega))$, соответственно (здесь T – период колебания гармоники).

При контрольных измерениях используется измеритель иммитанса. В диапазоне частот Δf с шагом в логарифмическом масштабе проводятся N измерений вещественной $\text{Re}(Z_{вх}(j\omega_i))$ и мнимой $\text{Im}(Z_{вх}(j\omega_i))$ составляющих входного импеданса RC-ЭРП. Далее строятся АЧХ – $|Z_{вх}(j\omega)|$ и ФЧХ – $\varphi(Z_{вх}(j\omega))$ на основе расчетов для каждой i -й частоты из массива измеренных значений соответственно по формулам $[\text{Re}(Z_{вх}(j\omega_i)) + \text{Im}(Z_{вх}(j\omega_i))]^{0.5}$ и $\arctg[\text{Im}(Z_{вх}(j\omega_i))/\text{Re}(Z_{вх}(j\omega_i))]$.

Двойные измерения ЧХ позволяют компенсировать влияния разнородных помех и погрешностей. Для оценки адекватности измерений в «блоке обработки результатов измерений» предусмотрен расчет коэффициента корреляции R_{xy} по формуле:

$$R_{xy} = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i \right] \left[N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N y_i \right]}}$$

где x и y – результаты измерений основным и контрольным методами соответственно; N – количество измерений.

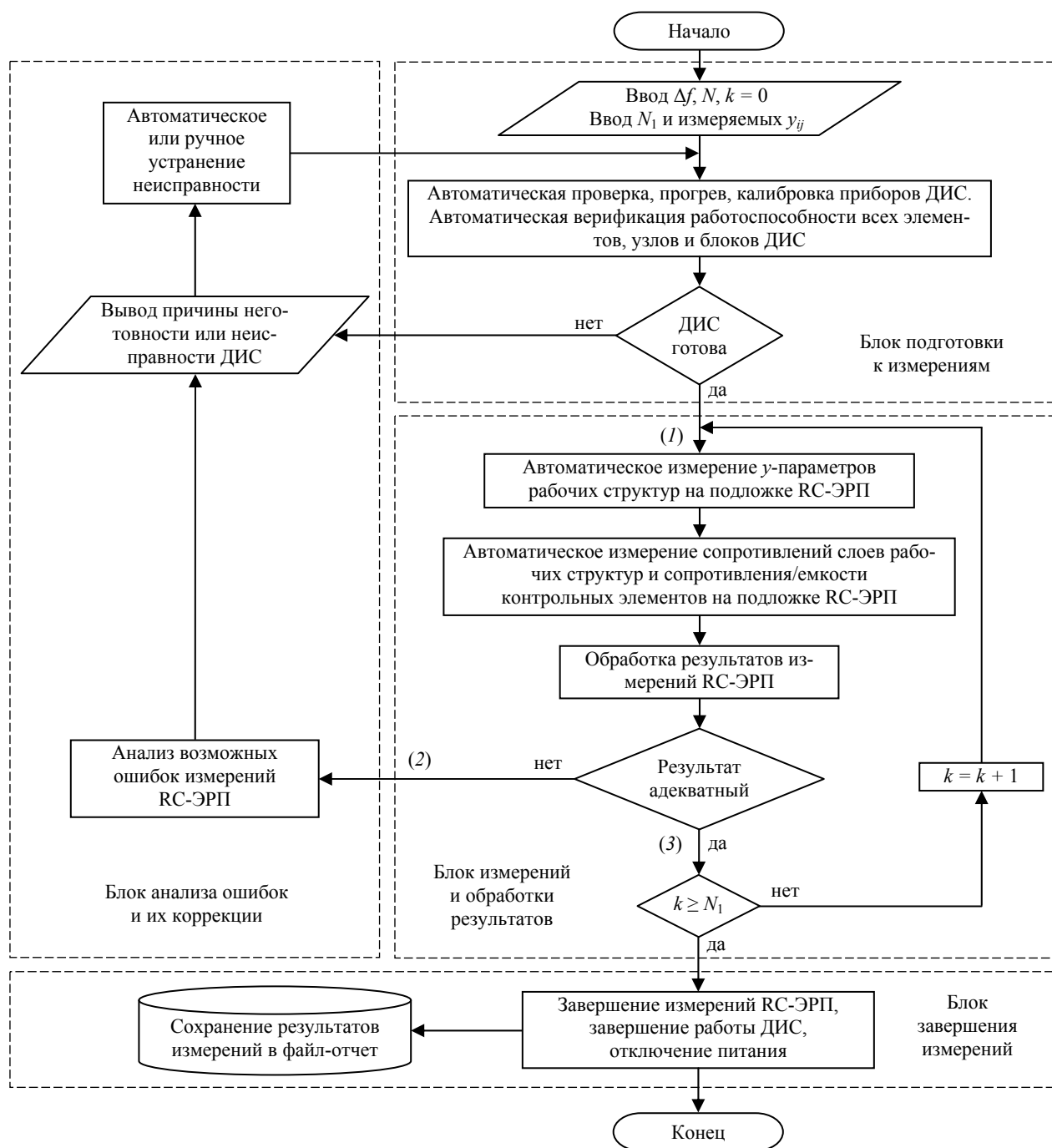


Рис. 3. Блок-схема алгоритма измерения параметров RC-ЭРП с применением ДИС

Если R_{xy} больше 0,95, то грубых погрешностей при измерениях допущено не было, измерения обоими методами корректны и адекватны. Для большей достоверности измерений итоговые ЧХ получают как средневзвешенные, полученные с помощью двух методов, т. е. $z_i = (x_i + y_i)/2$.

Если при обработке данных обнаружены ошибки или измерения оказались некорректными, то в соот-

ветствии с алгоритмом осуществляется переход в «блок анализа ошибок и их коррекции», в противном случае – в «блок завершения измерений».

Предложенная методика и измерительный комплекс реализован и испытан в ООО «ИРЗ ТЕСТ» и показал свою работоспособность и эффективность.

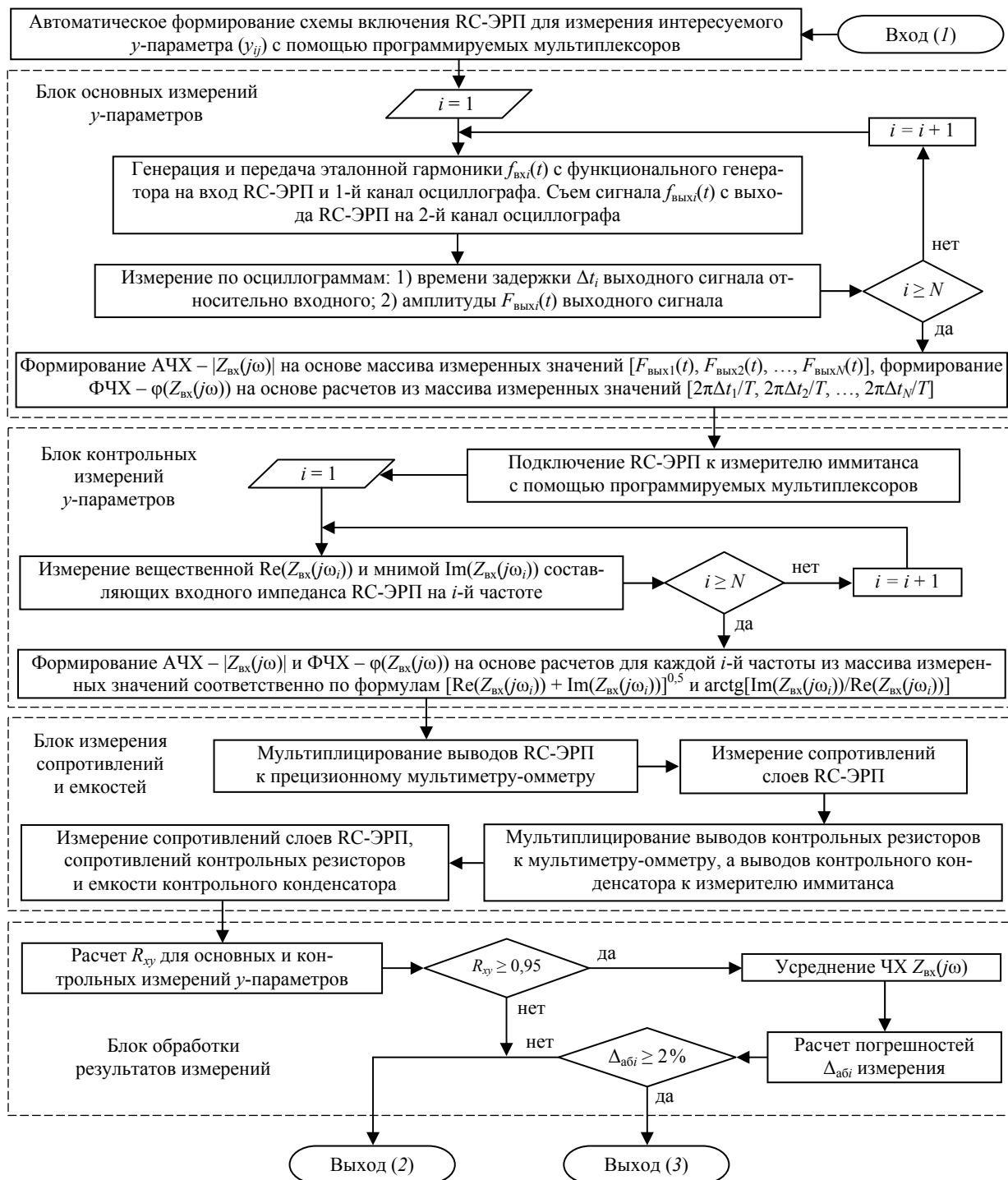


Рис. 4. Детальная блок-схема процедуры измерения параметров RC-ЭП и количественной оценки корректности данных измерений

Библиографические ссылки

1. Потапов А. А., Гильмутдинов А. Х., Ушаков П. А. Фрактальные элементы и радиосистемы: Физические аспекты / под ред. А. А. Потапова. – М.: Радиотехника, 2009. – 200 с.
2. Ушаков П. А., Гильмутдинов А. Х., Потапов А. А. Применение резистивно-емкостных элементов с распределенными параметрами и фрактальной размерностью: прошлое, настоящее и будущее // Нелинейный мир. – 2008. – Т. 6, № 3. – С. 183–213.
3. Гильмутдинов А. Х. Резистивно-емкостные элементы с распределенными параметрами: анализ, синтез и применение. – Казань: Изд-во КГТУ, 2005. – 350 с.
4. Ушаков П. А. Методы анализа и синтеза многослойных неоднородных RC-элементов с распределенными параметрами и устройств на их основе: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Казань: КГТУ, 2009. – 35 с.
5. Ushakov, P. A., Maksimov, K. O., Filippov, A. V. Research of fractal thick-film elements frequency responses // 11-th International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – Pp. 165-167.

* * *

P. A. Ushakov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

K. O. Maksimov, Assistant Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

A. V. Tarasov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Development of technique and means of automated identifying the electro physical parameters of specimens of multilayer film RC-structures

The paper considers the technique and measurement system for parametric identification of RC-elements with distributed parameters, the identification being necessary to create precise mathematical models, to improve the technique of element production and to promote the new elemental base to the market of electronic components. The measurement system, providing the automated operative parametric diagnostics and quantitative assessment for all RC-elements with distributed parameters is developed.

Keywords: RC-element with distributed parameters, fractal element, diagnostic measurement system, parametric identification of film structures

Получено: 02.11.12