

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

2010

№9 сентябрь

Ежемесячный
научно-технический
журнал
основан в 1939 г.

Издается
с приложением
«Метрология»

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д.И.Менделеева»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт оптико-физических
измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических
и радиотехнических измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

ФГУП «Уральский
научно-исследовательский
институт метрологии»

ФГУП «Российский
научно-технический центр
информации по стандартизации,
метрологии и оценке соответствия»

Метрологическая академия

СОДЕРЖАНИЕ

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

- Н. М. Карих, В. Ф. Матвейчук, А. В. Серов, С. Н. Сибирцев, Н. Н. Черноусова.** Государственный первичный эталон единиц относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей в диапазоне частот 1 МГц — 18 ГГц 3

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- Н. Н. Червяковская.** Использование механизма накопления погрешностей в поверочных схемах на основе вероятностного подхода как критерия оптимальности при анализе поверочных схем 8
- Н. Н. Карабутов.** О влиянии измерительной информации на свойства адаптивных систем 12
- А. А. Петрин.** Виртуальные датчики для применения в информационно-измерительных системах 17

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. Д. Попело, И. Р. Фахуртдинов.** Систематические погрешности измерений характеристик отражения малоразмерных объектов с когерентным характером отражения 21
- В. И. Смирнов.** Фундаментальные ограничения точности совместных измерений параметров оптических полей 26
- А. В. Тавров, Д. А. Орлов, И. И. Виноградов.** Расчет фазы при повороте изображения в неплоском поляризованном нуль-интерферометре 31
- В. А. Гречихин.** Спектральные оценки параметров сигналов лазерных доплеровских измерительных систем 37

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. В. Горюш, Д. А. Крючков, А. Г. Пивкин.** Исследование погрешностей волоконно-оптических датчиков давления аттенуаторного типа 42
- А. С. Мизгачев, В. Э. Чежегов, М. Н. Ларин, Г. Н. Галкин, Д. В. Ештушенко.** Установка для испытания на длительную прочность однонаправленных полимерных композиционных материалов 47

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Н. П. Моисеева.** Индивидуальная градуировка термометров сопротивления для измерения разности температур 50

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- М. Н. Сурду, А. Л. Ламеко, А. Е. Лабузов.** Прецизионный RLC-метр 54
- С. Г. Сандомирский.** Анализ погрешности измерения магнитной проницаемости ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи 57

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. П. Смирнов, И. М. Малай, А. В. Титаренко.** Расчет поправочных коэффициентов для уменьшения погрешности измерений коэффициента усиления СВЧ измерительных антенн в промежуточной зоне 61

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. А. Кузнецов.** Определение количественных характеристик в морфологии комплексов на электрокардиограмме. Интегральный метод анализа 65

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. А. Котенев, Д. Н. Тюрин, Е. Н. Каблов, А. Ю. Цивадзе.** Комплекс дистанционного лазерного мониторинга степени агрессивности окружающей среды 69

Главный редактор
В. Н. Крутиков

Редакционная коллегия:

В. С. Александров,
В. И. Белоцерковский,
Ю. А. Богомолов,
Ю. И. Брегадзе,
В. А. Вышлов, В. С. Иванов,
Л. К. Исаев, Г. И. Кавалеров,
А. Д. Козлов, С. А. Кононогов,
А. Ф. Котюк, П. А. Красовский,
А. Ю. Кузин,
В. М. Лахов
(зам. гл. редактора),
В. В. Леонов, В. Ф. Матвейчук,
А. И. Механиков,
В. В. Окрепилов, Ю. В. Тарбеев,
О. Е. Фомкина
(зам. гл. редактора),
Н. И. Ханов, В. Н. Храменков,
И. А. Шайко

**Журнал переводится
на английский язык
под названием
«MEASUREMENT TECHNIQUES»
издательством Springer
www.springer.com/11018**

Технический редактор *Г. А. Тербинкина*
Корректор *В. Е. Нестерова*

Сдано в набор 28.07.2010. Подписано
в печать 10.09.2010. Формат 60×90^{1/8}. Бумага
офсетная. Печать офсетная. Усл. п. л. 9,0.
Уч.-изд. л. 10,30. Тир. 579 экз. Зак. 1162.

*Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-21572
от 15.07.2005*
*Адрес редакции: 105062 Москва, Лялин пер., 6,
тел. 917-27-76;*
Почтовый адрес: 123995 Москва, Гранатный пер., 4
ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
e-mail: izmt@gostinfo.ru; izmt@yandex.ru; www.gostinfo.ru

Калужская типография стандартов,
248021 Калуга, ул. Московская, 256

© Измерительная техника, 2010

STATE STANDARDS

N. M. Karikh, V. F. Matveychuk, A. V. Serov, S. N. Sibirtsev, N. N. Chernousova. The State primary standard relative permittivity and permeance units in frequencies from 1 MHz to 18 GHz 3

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

N. N. Chervyakovskaya. Use of the mechanism of errors accumulation in verification schemes based on the probability approach as the optimality criterion at verification schemes analysis 8
N. N. Karabutov. About influence of the measuring information on properties of adaptive systems 12
A. A. Petrin. Virtual sensors for application in information systems 17

OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS

V. D. Popelo, I. R. Fakhurtdinov. Systematic errors of reflection parameters measurement for low-sized objects with coherent reflection 21
V. I. Smirnov. Fundamental restrictions of optical field parameters joint measurements accuracy 26
A. V. Tavrov, D. A. Orlov, I. I. Vinogradov. The phase calculation in nonplanar polarizing nullinterferometer at image rotation 31
V. A. Grechikhin. Spectral estimations laser Doppler measuring systems of signals parameters 37

MECHANICAL MEASUREMENTS

A. V. Gorish, D. A. Kryuchkov, A. G. Pivkin. Study of errors in the attenuator type fiber-optic pressure sensors 42
A. S. Migachev, V. E. Chezhegov, M. N. Larin, G. N. Galkin, D. V. Evtushenko. The installation for stress-rupture test of unidirectional polymer composites 47

TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

N. P. Moiseyeva. Individual calibration of platinum resistance thermometers for temperature difference measurement 50

ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

M. N. Surdu, A. L. Lameko, A. E. Labuzov. Precision RLC-meter 54
S. G. Sandomirsky. Analyzing the measuring error of permeability of a ferromagnetic material in an open magnetic circuit 57

RADIO MEASUREMENTS

A. P. Smirnov, I. M. Malay, A. V. Titarenko. The calculation of adjustment coefficients for reducing the gain measurements error of UHF measuring antennas in Fresnel zone 61

MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENTS

A. A. Kuznetsov. Quantitative characteristics determination in complexes morphology on the electrocardiogram. Integral analysis method 65

PHYSICO-CHEMICAL MEASUREMENTS

V. A. Kotenev, D. N. Tyurin, E. N. Kablov, A. Yu. Tsivadze. The complex for remote laser monitoring of environment aggressiveness degree 69

Прецизионный RLC-метр

М. Н. СУРДУ*, А. Л. ЛАМЕКО*, А. Е. ЛАБУЗОВ**

* Укрметртестстандарт, Киев, Украина, e-mail: msurdu@nbi.com.ua
 ** Коммерческо-промышленная фирма «ПРОМИКС», Киев, Украина, e-mail: labuzov@promix.com.ua

Описан прецизионный RLC-метр MHC1100, работающий в широком диапазоне частот и измеряемых параметров комплексного сопротивления. Прибор построен на основе новых принципов измерения импеданса с редуцированным набором мер и методов калибровки измерительных цепей, позволяющих существенно повысить точность измерения, расширить функциональные возможности и автоматизировать процесс настройки аппаратуры.

Ключевые слова: измерение, погрешность, импеданс, иммитанс, мера, частота.

The new precision RLC-meter MHC1100, operating in wide range of frequency and oscillatory impedance measuring parameters, is described. The instrument is based on the new impedance measuring principles with reduced number of inner measures and new methods of measuring circuit calibration, allowing to increase the measurement accuracy and function possibilities, and to automatize the equipment metrological adjustment process.

Key words: measurement, impedance, immitance, measure.

Импедансометрия представляет собой обширную и очень важную область измерений пассивных электрических и неэлектрических величин. Поэтому разработкой и производством соответствующей измерительной аппаратуры, прежде всего, высокого класса точности, занимаются многие известные во всем мире фирмы: Agilent Technologies Inc., QuadTech Inc., Tegan Inc. (США), Wayne Kerr Electronics (Великобритания). Они выпускают наиболее точную аппаратуру

(классов точности 0,02—0,1), работающую в широком диапазоне частот. В основу ее построения положены либо мосты переменного тока, либо измерители прямого преобразования логометрического типа. В последние годы в связи с широким применением вычислительной техники измерители импеданса прямого преобразования получают все большее распространение в силу простоты их реализации. Эти принципы были использованы и при создании прецизионного RLC-метра MHC1100, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

Генератор Г состоит из двух узлов: синтезатора частот с кольцом фазовой автоподстройки и синтезатора синусового сигнала. Последний формирует из дискретного сигнала на выходе синтезатора частот сигнал синусоидальной формы с малыми нелинейными искажениями, регулируемой амплитудой и необходимой мощностью. Этот сигнал используется для питания измерительной цепи ИЦ, в которую входит объект измерения Z_x , последовательно соединенный с балластным сопротивлением R_6 и включенный между выходом генератора Г и входом защитного усилителя У. В цепи обратной связи защитного усилителя включен эталонный резистор R_0 , сопротивление которого изменяется в процессе переключения пределов. Под действием напряжения генератора через Z_x и R_0 протекает один и тот же ток, создавая на них падения напряжения U_x и U_0 . Очевидно, что в соответствии с законом Ома

$$Z_x = R_0 U_x / U_0. \tag{1}$$

Уравнение (1) является измерительным уравнением прибора.

Напряжения U_x и U_0 измеряются дифференциальным векторным вольтметром ВВ, соединенным с ИЦ через коммутаторы К1 и К2. Коммутатор К1 служит для подключения ВВ поочередно к потенциальным клеммам объекта измерения и эталонной меры. Коммутатор К2

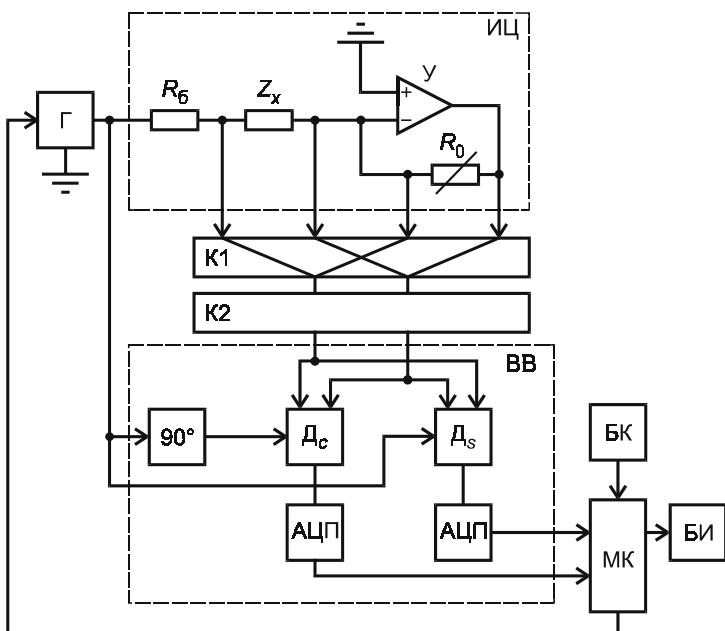


Рис. 1. Функциональная схема прецизионного измерителя импеданса MHC1100:

Г — генератор с цифровым управлением по частоте, амплитуде и фазе сигнала; ИЦ — измерительная цепь; У — усилитель; К1, К2 — входные коммутаторы; ВВ — векторный вольтметр; Дс, Дs — синхронные детекторы; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; МК — микроконтроллер; БИ — блок индикации; БК — блок клавиатуры

предназначен для изменения фазы подключения входов *ВВ* к источникам измеряемого напряжения. Векторный вольтметр является дифференциальным усилителем с высоким коэффициентом подавления синфазной помехи и содержит два синхронных детектора *D_s* и *D_c*, на которые подаются синусоидальные опорные сигналы, смещенные по фазе на 90°. Одновременно с изменением состояния коммутатора *K2* инвертируется фаза напряжения генератора.

Выпрямленные измеряемые переменные сигналы с выходов синхронных сигналов поступают на цифровые фильтры. Полученные постоянные напряжения измеряются при помощи двух 24-разрядных Σ - Δ аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

В процессе измерения напряжений *U_x* и *U₀* на выходе ИЦ действуют измеряемый сигнал (*U_x* или *U₀*), синфазная помеха *U_c* и постоянное напряжение смещения *U_{см}*. На выходе коммутаторов *K1* и *K2* и, следовательно, на входе *ВВ* присутствуют измеряемый сигнал (*U_x* или *U₀*), неподдавленные части синфазной помехи ΔU_c и постоянного напряжения смещения $\Delta U_{см}$. Напряжение *U_x* или *U₀* измеряются в два такта, при $+U_f$ и $-U_f$. Результат измерения *U_{x(0)}* какого-либо из двух напряжений *U_x* или *U₀* при двух фазах напряжения генератора представляется выражениями

$$U_{x(0)+} = U_{x(0)} + \Delta U_{см} + \Delta U_c; \quad U_{x(0)-} = U_{x(0)} - \Delta U_{см} - \Delta U_c,$$

откуда $U_{x(0)} = (U_{x(0)+} + U_{x(0)-}) / 2$. Этот результат, очевидно, не зависит от аддитивных помех $\Delta U_{см}$ и ΔU_c .

Описанный алгоритм измерения позволяет полностью исключить влияние не только $\Delta U_{см}$ и ΔU_c , но и смещений нуля синхронных детекторов, АЦП и других источников аддитивных погрешностей на результат измерения. Влияние неидеальности коэффициента передачи *ВВ* и его мультипликативной погрешности устраняется сокращением множителя при *U_x* и *U₀* при вычислении результата по (1).

Для повышения точности измерений используемый двухканальный *ВВ* автоматически калибруется. В соответствии с разработанным алгоритмом для калибровки на его вход подается сигнал генератора $U_f = U_{fm} \sin(\omega t + \varphi_0)$. Калибровка основана на известной вариации влияния источника погрешности на результат измерения и решении соответствующей системы уравнений. Исследования показали, что для упрощения системы уравнений и реализации калибровки рационально измерять выходные сигналы векторного вольтметра *U₁*, *U₂* и *U₃*, *U₄* полученных при подаче по очереди на опорные входы детекторов последовательно двух опорных напряжений $U_{s\text{on}} = U_{c\text{on}} = U_{\text{он}} \sin \omega t$ и $U_{s\text{on}} = U_{c\text{on}} = U_{\text{он}} \cos \omega t$.

Тогда, решая соответствующую систему уравнений, найдем разность фазовых задержек $\text{tg } \Delta\varphi$ каналов и отношение коэффициентов передачи *K* каналов *ВВ*, которые выражаются формулами:

$$\text{tg } \Delta\varphi = \frac{U_2 U_3 - U_1 U_4}{U_1 U_2 + U_3 U_4};$$

$$K = \frac{U_1}{U_2} \left(1 + \frac{U_3}{U_1} \text{tg } \Delta\varphi \right) / \sqrt{1 + \text{tg}^2 \Delta\varphi}.$$

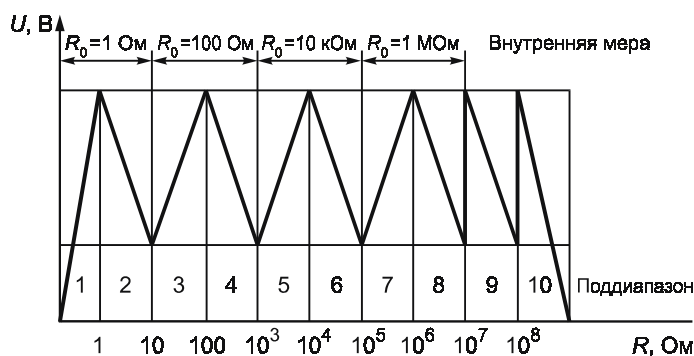


Рис. 2. Диаграмма измерительного сигнала на поддиапазонах измерения

В процессе определения комплексного сопротивления *Z_x* измеряются с некоторой погрешностью составляющие *U_s* и *U_c* входного сигнала *ВВ*. Для учета неидеальности каналов векторного вольтметра в расчетную формулу (1) вводятся скорректированные напряжения *U_{ск}* и *U_{ок}*, квадратурные компоненты *U_{ск}* и *U_{ок}* каждого из которых определяются из выражений

$$U_{ск} = U_s / K; \quad U_{ок} = U_{ск} \text{tg } \Delta\varphi + U_c \sqrt{1 + \text{tg}^2 \Delta\varphi},$$

учитывающих погрешности векторного вольтметра.

Выходные сигналы АЦП поступают в микроконтроллер МК, в котором в соответствии с (1) вычисляется *Z_x*. Результат измерения импеданса индицируется на матричном жидкокристаллическом табло, на котором также выводится информация о размерности результата измерения, рабочей частоте, измерительных режимах и т. д. Оператор управляет процессом измерения при помощи клавиатуры, вводя необходимую информацию через микроконтроллер.

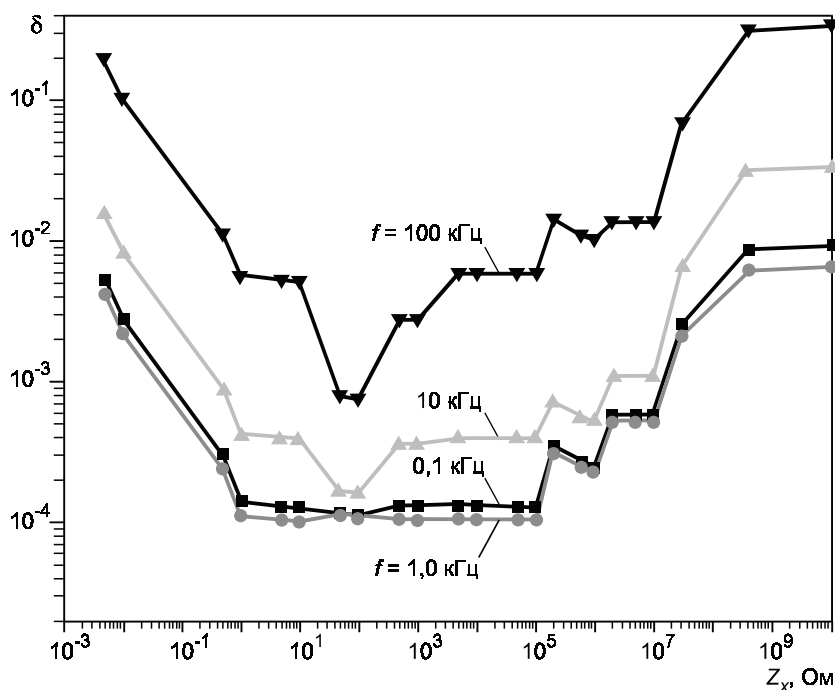


Рис. 3. Зависимости погрешности измерений импеданса от частоты

Прибор имеет восемь десятичных поддиапазонов. Переход с одного поддиапазона измерения на другой сопровождается переключением эталонных мер 1; 100; 10^4 ; 10^6 Ом в цепи обратной связи защитного усилителя. Измерения на первом поддиапазоне ($0 < Z < 1$ Ом) и на нечетных поддиапазонах проводятся в режиме заданного тока, а на четных — в режиме заданного напряжения. Использование такого алгоритма позволяет одной мерой перекрыть два диапазона измерения. Характер поведения измерительного сигнала на выходе ИЦ показан на рис. 2. На дополнительных поддиапазонах 9 и 10 эквивалентное значение внутренней эталонной меры увеличивается соответственно в 10 и 100 раз. Это позволяет расширить диапазон измерения и повысить разрешающую способность прибора до 10^{-11} См.

Основными в приборе являются внутренние меры с номинальными сопротивлениями 100 Ом и 10 кОм. Чтобы обеспечить высокую точность измерений на поддиапазонах, где используются другие меры, в приборе предусмотрен режим калибровки. В процессе калибровки происходит автоматическая передача размера импеданса всем внутренним мерам прибора, при этом их импеданс определяется с высокой точностью. Процесс передачи размера импеданса внутренней меры проводится автоматически последовательно на ряде фиксированных частот во всем диапазоне рабочих частот. Это позволяет не только определить значения внутренних мер, но и найти коэффициенты полиномов, аппроксимирующих частотную зависимость параметров каждой внутренней меры от частоты. Указанные полиномы используются при расчете результатов измерений на заданной рабочей частоте. Благодаря калибровке частотную погрешность прибора можно снизить в 100 и даже более раз.

Прецизионный RLC-метр МНС1100 по своим параметрам полностью заменяет устаревший и давно снятый с производства автоматический мост Р5083, имеет более высокие метрологические характеристики и расширенные функциональные возможности. Прибор обеспечивает автоматический выбор диапазона измерений и характера реактивности эквивалентной схемы замещения объекта измерений; четырехзажимное подключение объекта измерения; измерение с регулировкой частоты и амплитуды напряжения переменного тока, подаваемого на объект измерения; совместную работу с персональным компьютером через интерфейс RS-232.

Режимы работы прибора: калибровка (самокалибровка) по внешней эталонной мере сопротивления, емкости или индуктивности; усреднение результатов при количестве измерений от 2 до 99; учет начальных параметров по последовательной и параллельной схемам; однократное и непрерывные измерения и др.

Ниже приведены основные метрологические характеристики прецизионного RLC-метра МНС1100.

Диапазоны значений измеряемых величин:

сопротивление на постоянном или переменном токе
 $R = 1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{11}$ Ом;

емкость $C = 1 \cdot 10^{-17} \dots 10$ Ф;

индуктивность $L = 1 \cdot 10^{-10} \dots 1 \cdot 10^8$ Гн;

взаимная индуктивность $M = 1 \cdot 10^{-6} \dots 1$ Гн;

тангенс угла потерь $\text{tg } \delta = 1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^5$;

$\text{tg } \Delta\varphi = \pm (1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^5)$.

Рабочие частоты: постоянный ток и переменный ток от 0,5 до 100 000 Гц.

Дискретность установки рабочей частоты не более $3 \cdot 10^{-5}$, погрешность задания рабочей частоты менее $2 \cdot 10^{-5}$.

На основной частоте 1 кГц класс точности прибора 0,01/0,001, а при калибровке по внешней мере — 0,003/0,0003.

Зависимости относительной погрешности δ измерения от значения измеряемой величины и частоты приведены на рис. 3.

Дискретность цифрового отсчета (на младшем диапазоне измерений):

$1 \cdot 10^{-5}$ Ом по сопротивлению R ;

$1 \cdot 10^{-17}$ Ф по емкости C ;

$1 \cdot 10^{-10}$ Гн по индуктивности L ;

$1 \cdot 10^{-8}$ Гн по взаимной индуктивности M .

Погрешность измерения сопротивления постоянному току менее 10^{-4} . Погрешность равноименного сравнения сопротивления на постоянном токе менее $1 \cdot 10^{-5}$.

Диапазон напряжения переменного тока на объекте измерений (в зависимости от значений измеряемых величин) — от 0,01 до 4 В.

Время измерения на частоте 1 кГц не более 2 с.

Потребляемая мощность не более 10 В · А. Габаритные размеры не более 120×290×300 мм. Масса не более 5 кг.

Прецизионный RLC-метр МНС1100 сертифицирован и внесен в государственные реестры средств измерений Беларуси, Казахстана, России, Украины.

Дата принятия 30.03.2010 г.