



Производство и поставка приборов для  
электрохимических исследований

ООО "Элинс"

## Импедансметр Z-500PRO – использование прибора и его возможности

AN14-Z-500PRO usage and performance capabilities

ООО "Элинс"

Черноголовка 2013

Настоящий документ написан при использовании результатов заводских испытаний импедансметра Z-500PRO. В нем приведено достаточно много примеров относительно сложных случаев измерения импедансных спектров различных объектов.

Одной из целей создания настоящего документа было показать, какие типовые ошибки могут возникнуть при работе с импедансметром, и как их лучше всего избежать.

Большинство идей и принципов могут быть актуальны при работе с другими импедансметрами, а на постоянном токе – с потенциостатом.

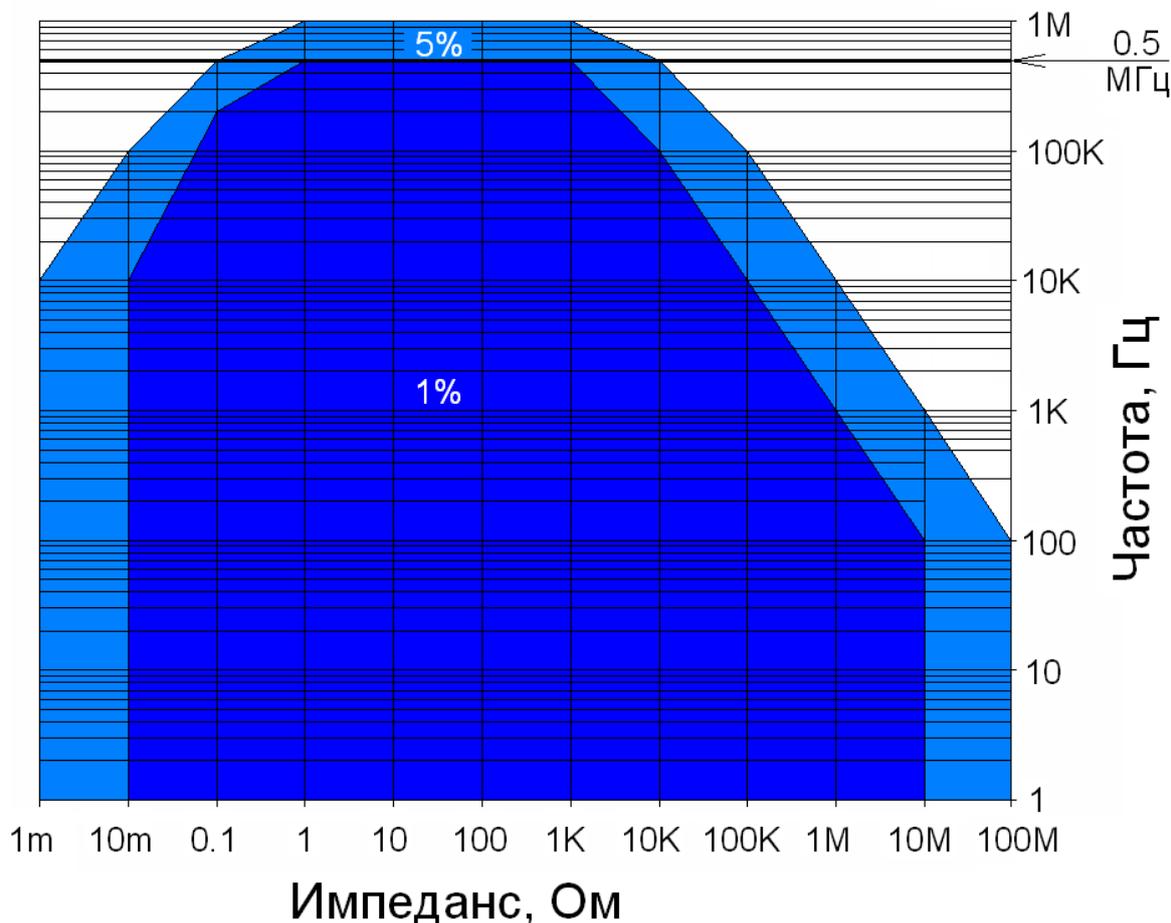
Также этот документ наглядно демонстрирует многие возможности импедансметра Z-500PRO и может быть полезен при выборе прибора, чтобы заранее убедиться - на сколько он подходит для Вашей задачи.

## Содержание

1	Некоторые характеристики прибора	3
2	Подключение прибора к исследуемому объекту	5
3	Короткое замыкание, проверка разрешения по импедансу самого грубого диапазона	9
4	Медный провод - пример саморазогрева при больших токах	12
5	Измерение нескольких активных низкоомных сопротивлений	14
6	Регистрация импедансных спектров нескольких простых промышленных ХИТ	15
7	Модельные RC-цепи, область низких значений импеданса	17
8	Модельные RC-цепи область средних значений импеданса	21

## 1. Некоторые характеристики прибора.

Основной характеристикой, на которую будет опираться настоящий документ, является следующая диаграмма из инструкции к импедансметру Z-500PRO:



На этом рисунке синим цветом выделена область максимальных частот и импедансов, при которых прибор обеспечивает точность измерения не хуже 1%. Пользователю рекомендуется работать именно в этих условиях. Напомним, что максимальной паспортной рабочей частотой прибора Z-500PRO является частота 500 КГц.

В то же время прибор допускает работу при частотах до 1 МГц. В настоящем документе будет приведено несколько примеров вполне неплохих импедансных спектров с этими частотами. Также на этом рисунке показана более светлая узкая область, в которой тоже можно работать, но с более высокой погрешностью.

Особенно следует отметить область сверх низких импедансов – на уровне единиц миллиом. Это, пожалуй, самая сложная область, и в ней, как правило, могут работать только весьма дорогие приборы и с сильным ограничением по максимальной частоте. Импедансметр Z-500PRO способен измерять импедансы на

уровне единиц миллиом на частотах до 10 КГц. Для работы с низкими импедансами прибор имеет два высокотоковых диапазона – на три ампера и на два. Если Вам необходимо относительно точно зарегистрировать постоянные токи, а измеряемые импедансы не столь низкие, то лучше воспользоваться двухамперным диапазоном. Трехамперный диапазон достаточно грубый по постоянному току, но только с его помощью можно работать с импедансами на уровне нескольких миллиом или их десятков.

Собственный ноль прибора (он же – погрешность самого грубого диапазона, будет измерен и приведен далее) на самом грубом диапазоне не выходит за пределы  $\pm 0.15$  миллиом в интервале частот до 10 КГц при максимальном переменном токе 0.5 А. Это означает, что импеданс в один миллиом может быть измерен с точностью 15% (что на практике очень даже неплохо), а 10 миллиом могут быть измерены уже с точностью около двух процентов. В инструкции к прибору приведена таблица с примерами измерений и достигаемой при этом точности измерения. По сути, эта таблица является набором исходных данных, из которых строилась приведенная выше диаграмма.

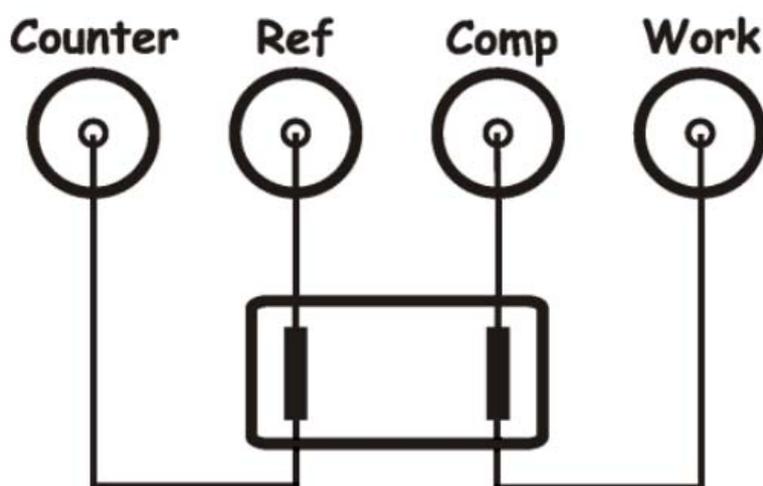
Несколько технических особенностей импедансметра Z-500PRO, отличающих его от приборов предыдущих поколений (новые качественные особенности приведены в основной инструкции к прибору):

- Для повышения точности и помехоустойчивости низкие частоты (5 Гц и ниже) используют аппаратный оверсемплинг, степень которого растет с понижением частоты.
- Высокочастотный блок частотного анализатора (48-кратное превышение частоты дискретизации максимальной паспортной аналоговой рабочей частоты).
- Субнизкочастотный делитель частоты, позволяющий получить плавный спектр частот возле нижней границы рабочих частот.
- Использование интегрального усилителя мощности потенциостата делает схему менее требовательной к настройкам стабильности в многоэлектродных ячейках, но ограничивает частотный диапазон прибора. Также он позволяет работать с высокими амплитудами переменного сигнала.
- Применение импульсных блоков питания усложнило конструкцию прибора, но позволило получить хорошие мощностные показатели, необходимые при активной работе с ХИТ.

## 2. Подключение прибора к исследуемому объекту.

На первый взгляд тривиальный вопрос – как правильно подключить исследуемый образец, может породить очень большие систематические и случайные погрешности в измерениях. Особенно это касается низких сопротивлений.

Как правило, такие объекты, как различные ХИТ и их компоненты, тестируют по двухэлектродной схеме. Крайне важно при этом использовать четырехточечное подключение. Основная идея четырехточечного подключения в двухэлектродной схеме состоит в том, что у каждого измерительного провода должна быть своя отдельная точка подключения на исследуемом объекте. Обратите, пожалуйста внимание на схему четырехточечного подключения из инструкции к прибору:



В четырехточечном подключении потенциальные провода компенсируют сопротивление (и импеданс) не только самих токовых проводов, но и сопротивление контактов подключения токовых электродов к исследуемому образцу.

Сопротивление контактов может достигать десятков миллиом. То есть, к примеру, величину, сопоставимую с активным сопротивлением электролитического конденсатора, емкостью 1000 мкФ. Если же исследуемый объект имеет собственный импеданс на уровне нескольких миллиом, то необдуманное подключение измерительных проводов может привести к совершенно полному искажению и недостоверности экспериментальных данных! Пожалуйста, будьте аккуратны при выборе точек подключения измерительных электродов к исследуемому объекту!

Обратите, пожалуйста, внимание также на переднюю панель Вашего прибора. Все без исключения приборы производства ООО Элинс специально имеют очень наглядную переднюю панель: просто проложите все измерительные провода параллельно друг другу от прибора к исследуемому объекту, и Вы получите четырехточечное подключение (равно как и любую другую схему – 2, 3 или 4

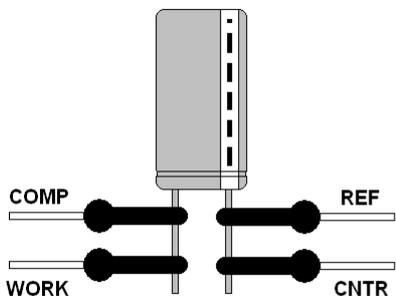
электрода). Такая наглядность, в совокупности с подписями знаков полярности на передней панели, призваны исключить необходимость запоминания схем подключения и назначения проводов как таковых, а делают подключение удобным, наглядным и понятным:



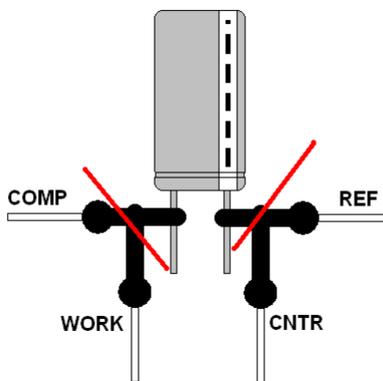
Далее будет приведено несколько примеров различных объектов с правильным подключением, а также некоторые примеры с наглядно продемонстрированными ошибками.

Электронный компонент типа конденсатора (промышленного небольшого ионистора, суперконденсатора и т.п.):

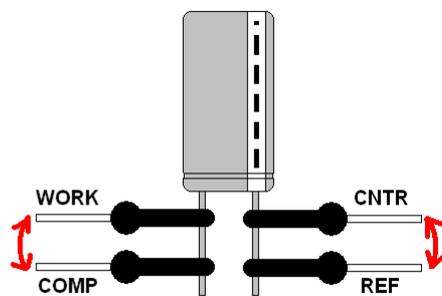
**Правильно**



**Неправильно**

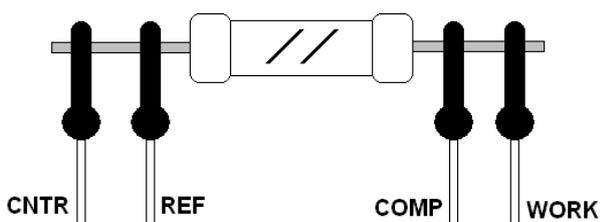


**Неправильно**

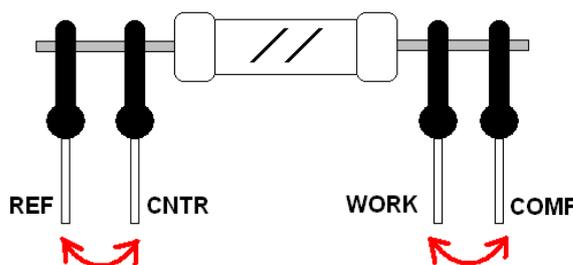


Электронный компонент типа резистора:

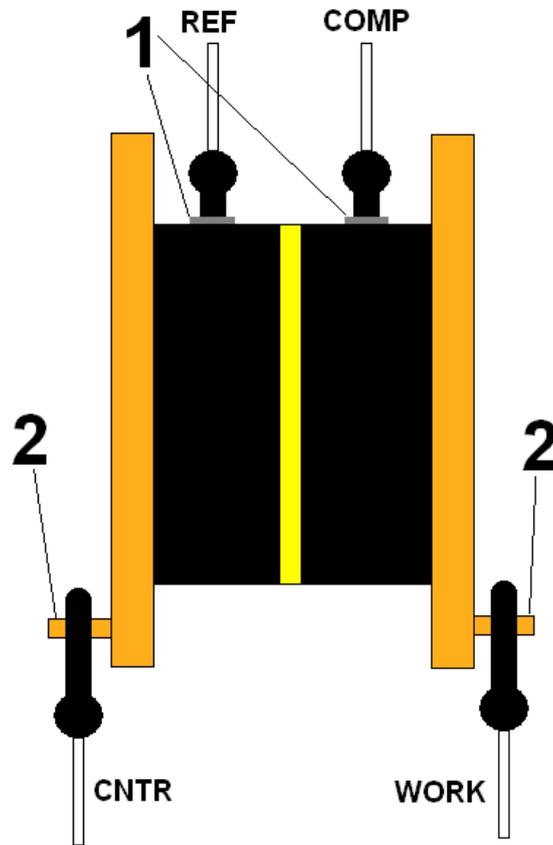
**Правильно**



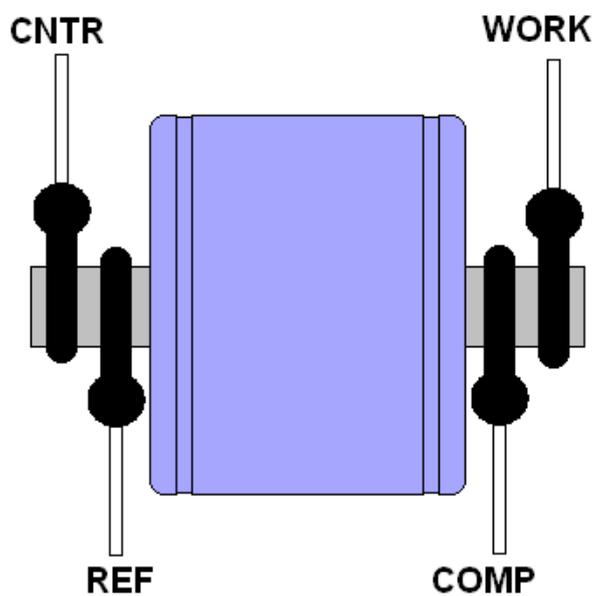
**Неправильно**



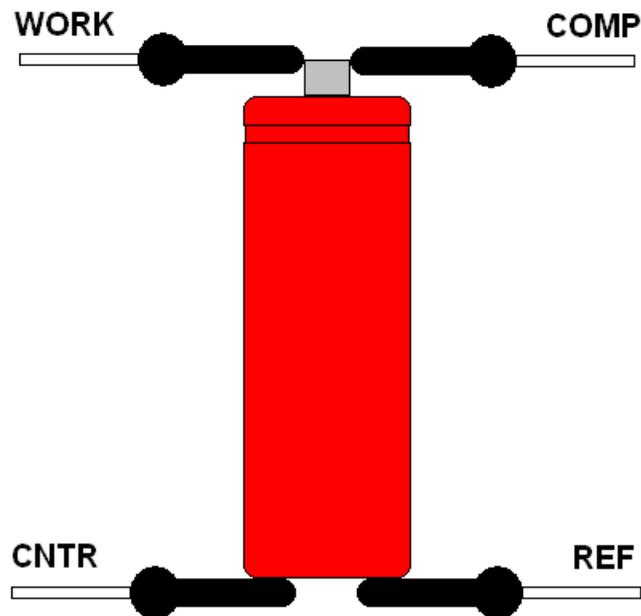
Современная ячейка для тестирования топливных элементов (1 - специальные терминалы для подключения потенциальных - измерительных электродов в биполярных пластинах, 2 – силовые винтовые зажимы для подключения токовых электродов):



Средний промышленный суперконденсатор (ионистор):

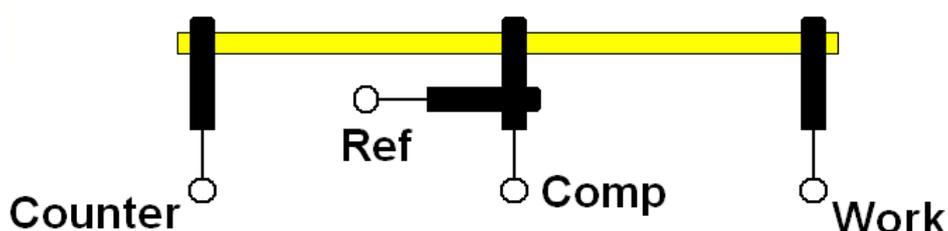


Промышленная батарея или аккумулятор (конструктивно, правильно к ним подключиться сложнее всего, так как не за что ухватиться. Приходится либо подпаивать отдельные контакты для каждого (!) провода, либо конструировать специальные зажимы):



### 3. Короткое замыкание, проверка разрешения по импедансу самого грубого диапазона.

В качестве исследуемого объекта использован медный многожильный провод площадью около 2 мм<sup>2</sup>. При этом подключение измерительных зажимов "крокодил" было следующим:

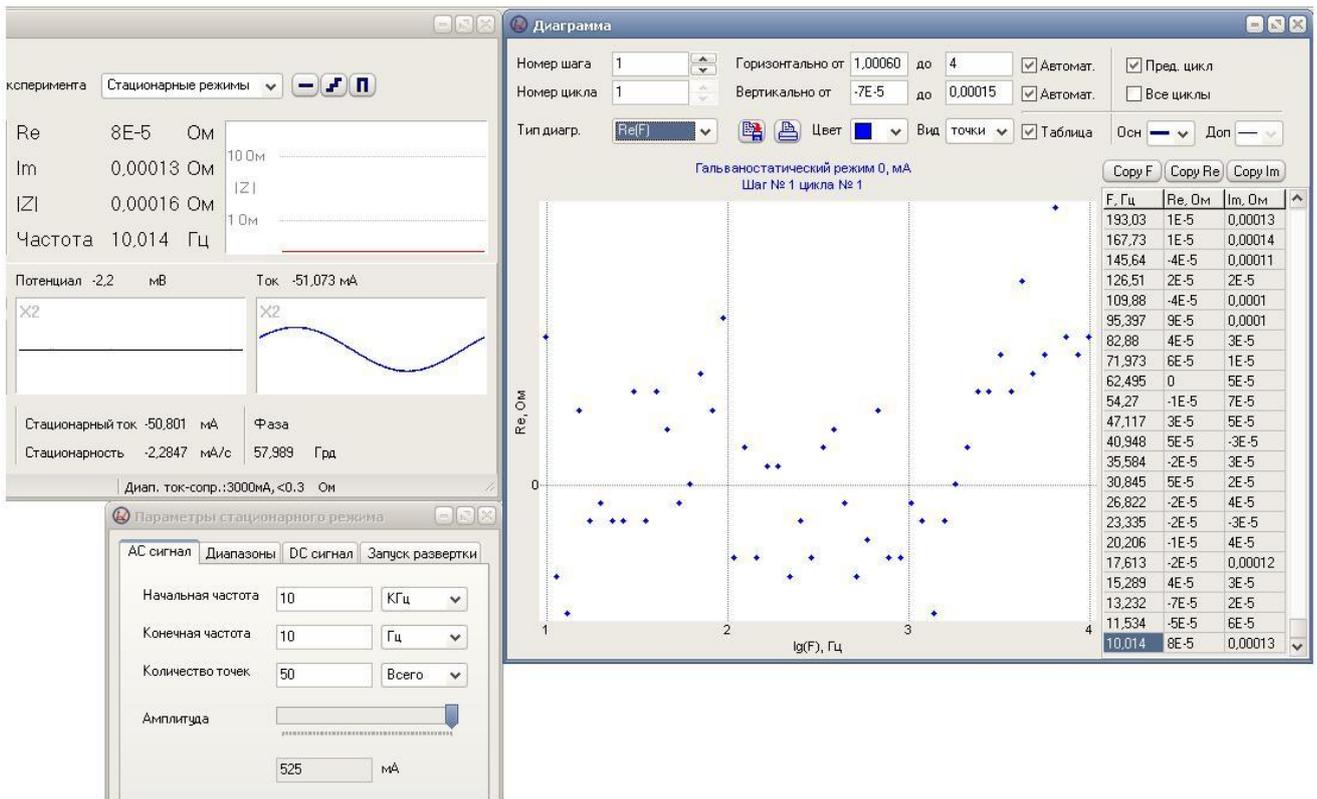


Переменный ток протекает между токовыми электродами Counter и Work. Один из потенциальных электродов (Comp) подключен примерно по середине медного провода. При этом принципиально важно, что второй потенциальный провод (Ref) подключен не к измеряемому проводу, а к первому потенциальному зажиму (Comp). Такое подключение позволяет избежать возникновения падения какого либо напряжения между потенциальными электродами.

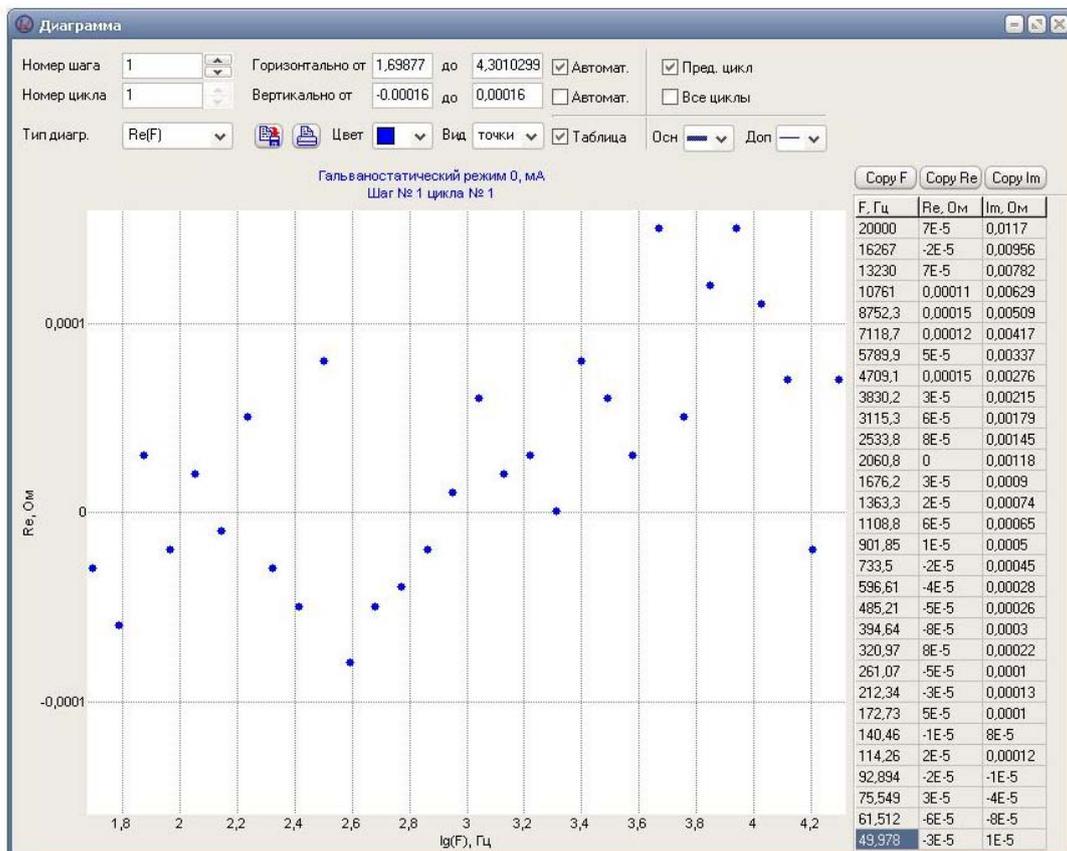
Измерение проводилось в гальваностатическом режиме при амплитуде переменного тока 500 мА. Постоянный ток равен нулю. Как видно из следующего рисунка, разброс величины действительной части при частотах до 10 КГц лежит в пределах 0.15 мОм.

При повторении эксперимента может быть использован любой медный провод площадью от 0.3 до 10 мм<sup>2</sup>.

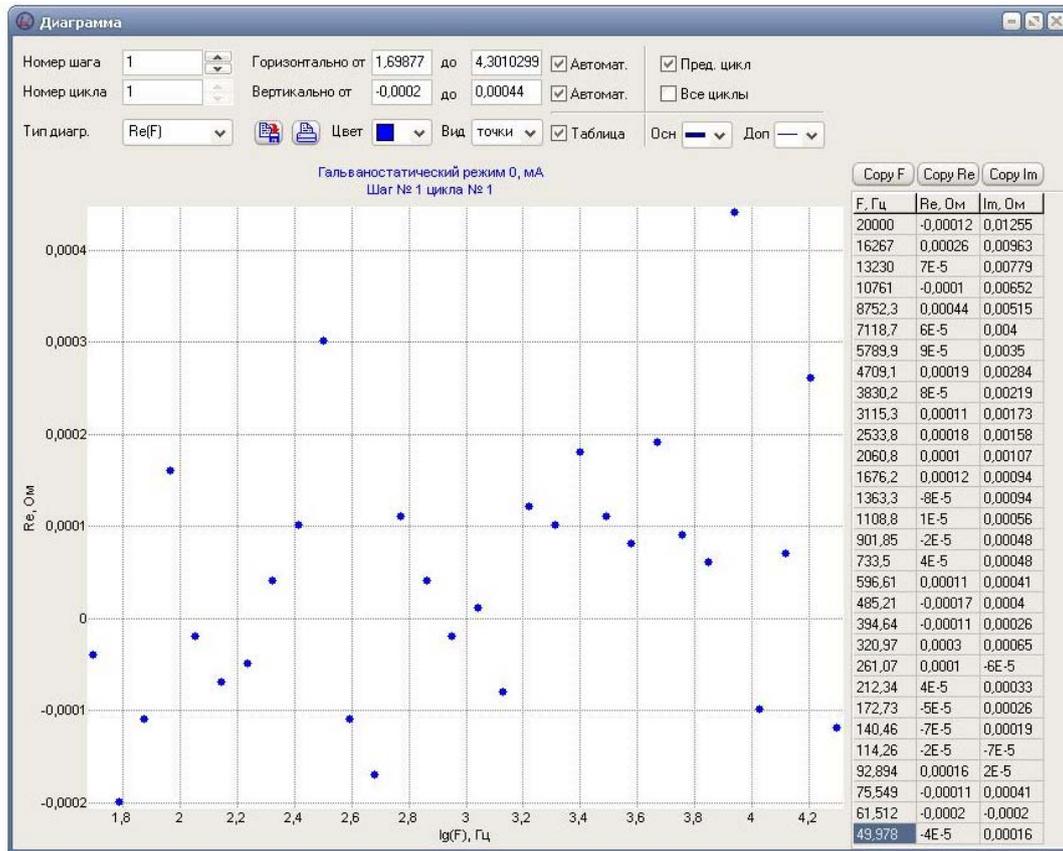
Остальные значимые параметры эксперимента видны на рисунке.



То же самое в новой диаграмме при частотах до 20 КГц при амплитуде 500 мА:



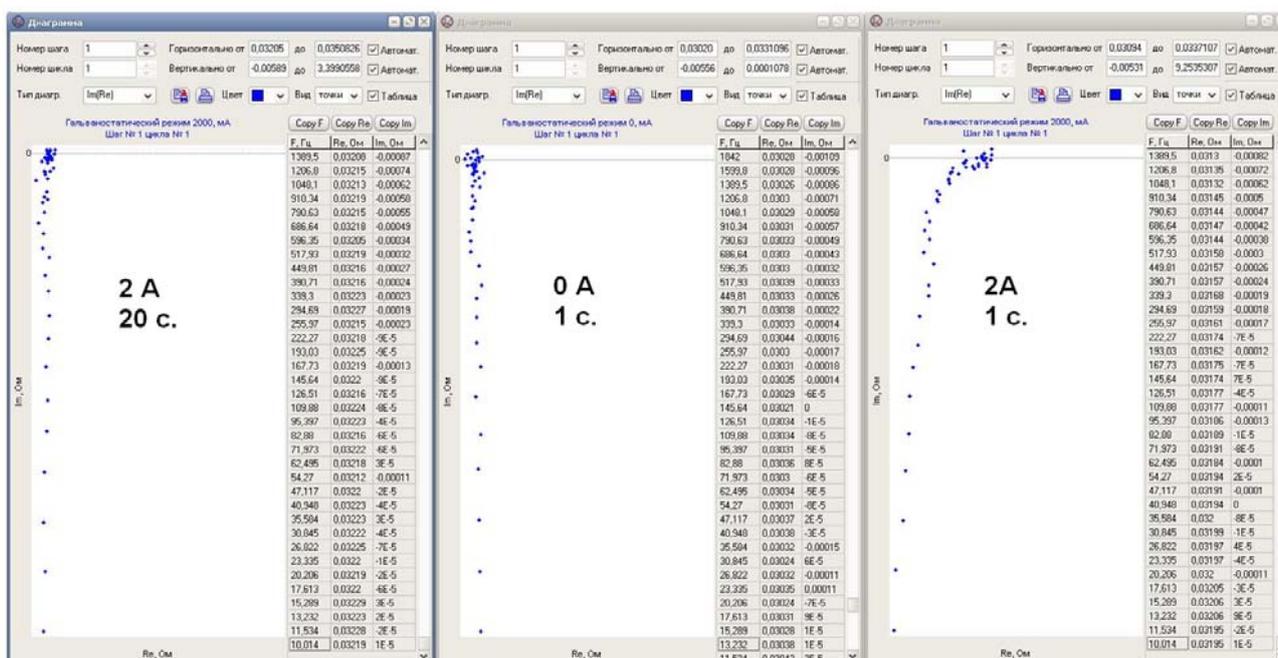
При амплитуде 100 мА:



#### 4. Медный провод - пример саморазогрева при больших токах.

Следующий пример призван продемонстрировать влияние высоких токов и того, как они могут исказить эксперимент при неправильном подходе.

Измерения проводились практически аналогично предыдущему примеру, но на медном проводе существенно меньшего сечения – порядка 0.3 мм<sup>2</sup>. При этом в гальваностатическом режиме задавали постоянный ток 0 ампер, либо 2 ампера. На рисунках ниже приведены полученные годографы импеданса. На двух правых рисунках регистрация импедансного спектра начиналась практически сразу после запуска эксперимента (время выдержки перед запуском 1 секунда – приведено на рисунке):



При записи первого годографа было выбрано достаточное время подготовки перед запуском развертки частоты – 20 секунд.

Видно, что третий спектр отличается от первых двух. На самом деле разные все три годографа. На них хорошо видно индуктивное поведение провода (разрешение по импедансу и частотные свойства прибора позволяют устойчиво и воспроизводимо его наблюдать). Эта индуктивность проявляет себя как вертикальная прямая, выходящая из минусовой области 4-го квадранта на высоких частотах, и стремящаяся с понижением частоты приблизиться к действительной оси.

Важным моментом является то, что в процессе эксперимента на первом и втором замерах к проводу был приложен достаточно большой постоянный ток, что вызвало его разогрев, и как следствие увеличение его омического сопротивления. Важно заметить, что разогрев происходит не мгновенно, а за несколько секунд (но менее, чем за 20 секунд).

При регистрации первого годографа было выбрано достаточно большое время установления постоянного тока перед запуском регистрации импедансного спектра. При этом провод успел разогреться и прийти к относительному температурному равновесию. То же самое произошло и с его активным сопротивлением. Поэтому значения действительной части импеданса оставались неизменными на протяжении всей развертки частоты.

При регистрации второго годографа постоянный ток не прикладывался, поэтому провод не разогревался, а по действительной оси также ничего не менялось.

При регистрации же третьего годографа, провод разогревался уже в процессе измерения импедансного спектра. Поэтому уже в процессе регистрации годографа происходил рост активного сопротивления провода, и наблюдался дрейф по действительной оси в сторону больших значений. Это привело к заметному искажению годографа импеданса.

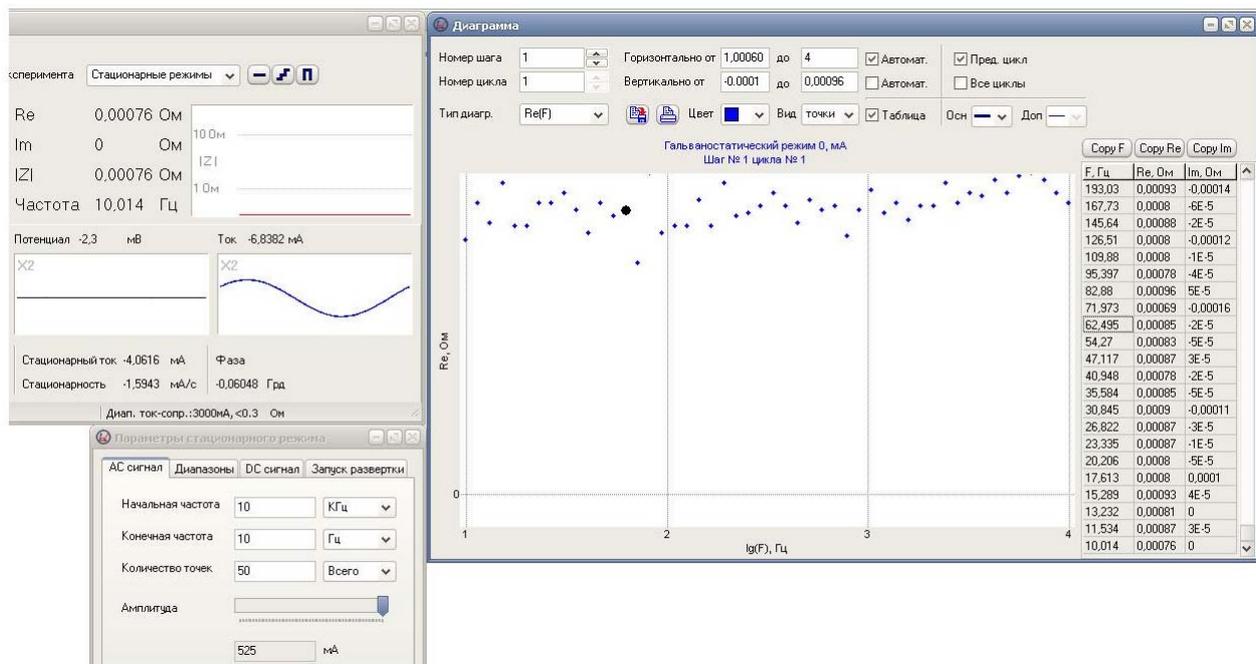
В данном эксперименте безошибочно проведен только второй замер. В первом и третьем имеются систематические экспериментальные погрешности, с той лишь разницей, что в первом они маскированы, а на самом деле измерение сопротивления провода было произведено неизвестно при какой его температуре с заметными для прибора искажениями.

К сожалению, подобные явления могут возникнуть как при работе с ХИТ, так и при измерении электрических свойств высокопроводящих материалов. В обоих случаях следует использовать высококачественные токоподводы – они не только обеспечат хороший электрический контакт, но могут помочь снять избыток выделяемой тепловой мощности с исследуемого объекта и охладить его (хотя в некоторых случаях и задачах это может быть наоборот вредно!). Также следует учитывать индивидуальные особенности исследуемого образца. Не стоит без необходимости применять высокие амплитуды переменного сигнала, так, например, 500 миллиампер переменного тока тоже могут вызвать заметные тепловыделения и исказить данные, и даже разрушить исследуемый объект. Также, следует использовать четырехточечное подключение даже при работе с невысокими токами и не столь низкими импедансами.

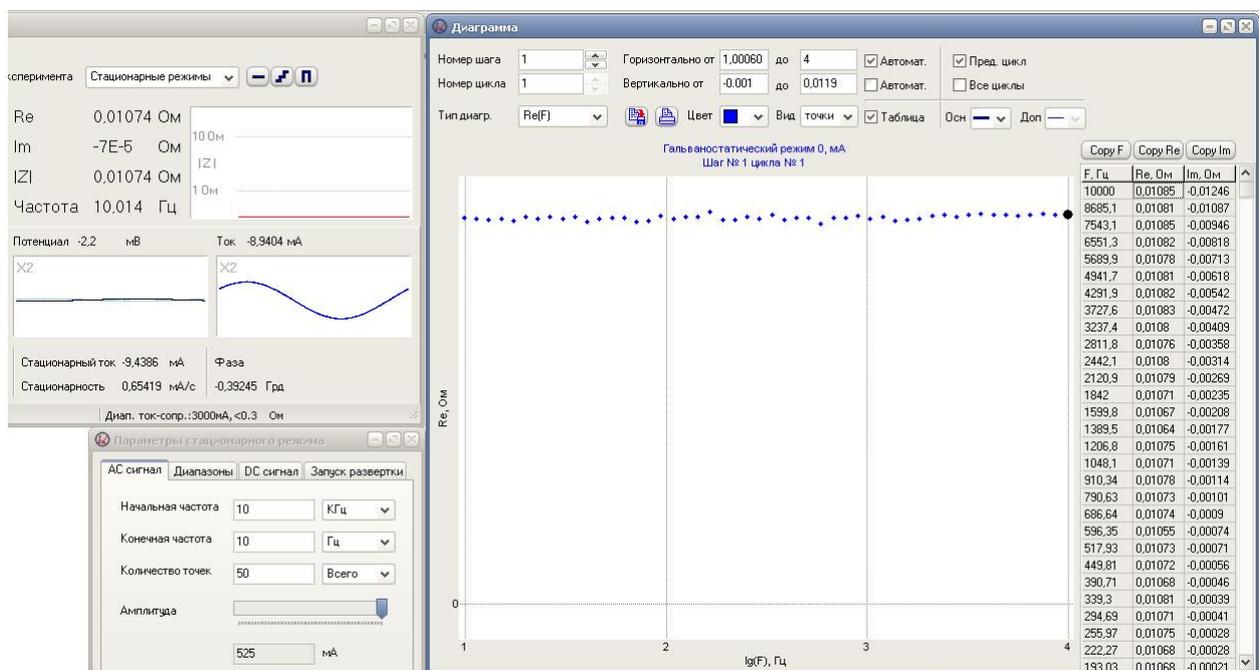
## 5. Измерение нескольких активных низкоомных сопротивлений.

Следующие эксперименты проведены с использованием медных проволок различного сечения только с одной целью – продемонстрировать возможность измерения малых сопротивлений в интервале частот до 10 КГц.

0.85 мОм:

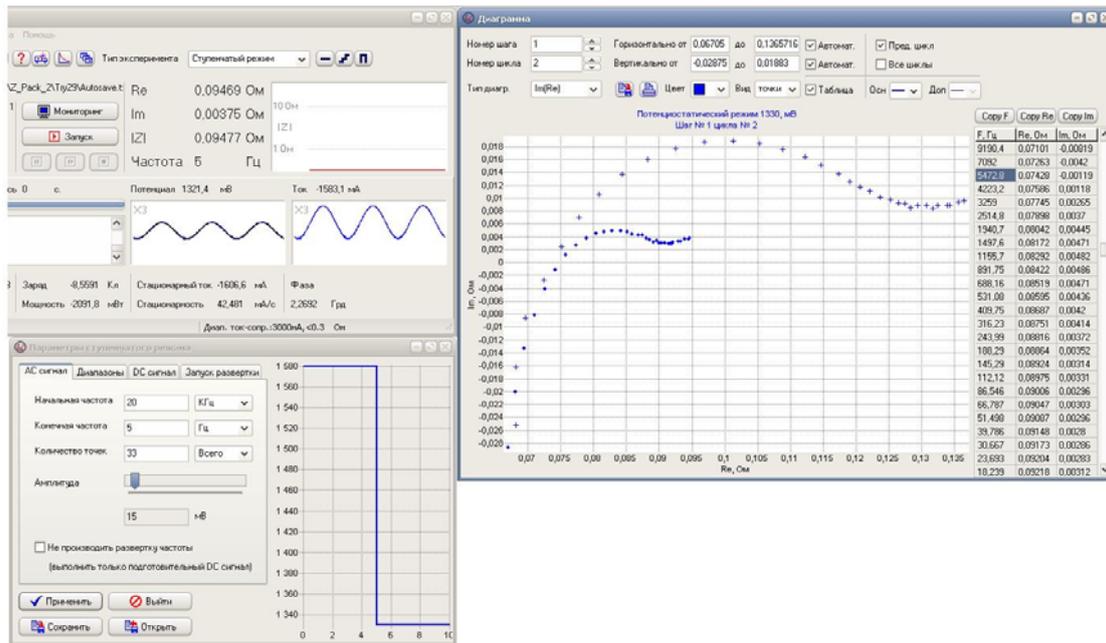


10.5 мОм:



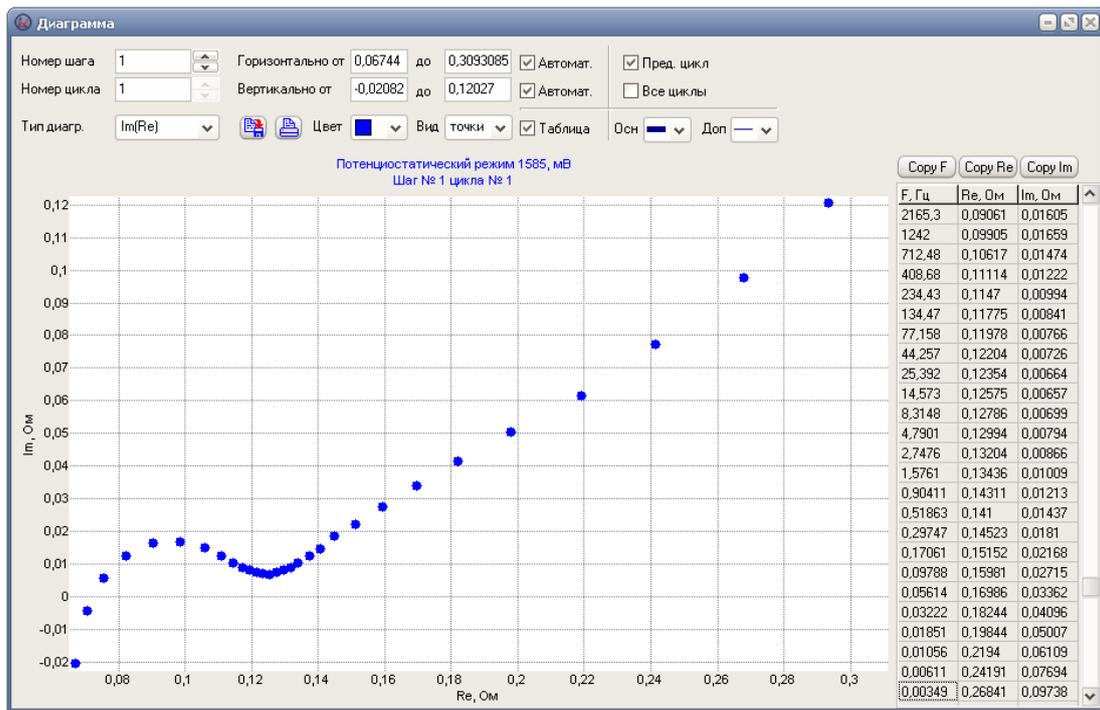
## 6. Регистрация импедансных спектров нескольких простых промышленных ХИТ.

Пальчиковая батарея AA типа под нагрузкой и без нее. Амплитуда переменного напряжения 15 мВ. Использован ступенчатый потенциостатический режим с одной ступенью -250 мВ.

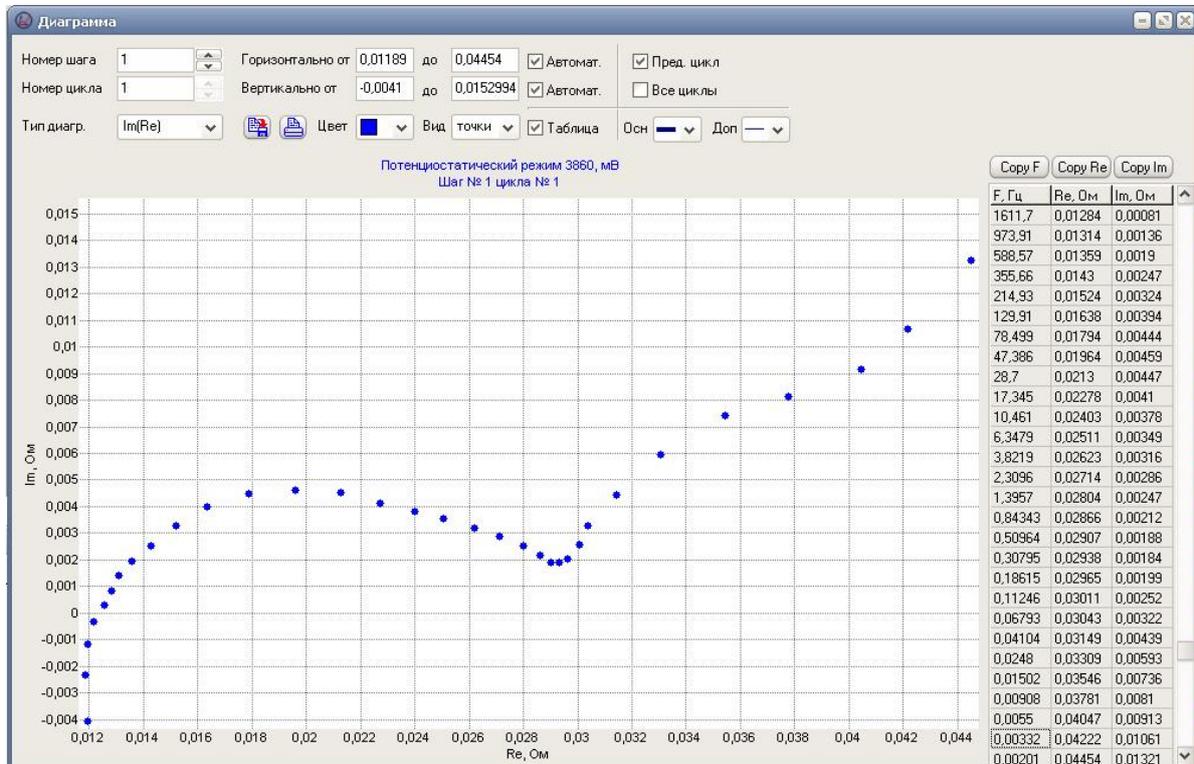


На рисунке видны два годографа. Первый - при потенциале близком к ЭДС. Второй – нагрузочный меньше по размеру.

Та же батарея, без нагрузки, но с нижним пределом по частоте – 2 миллигерца – минимально возможная частота для импедансметра Z-500PRO:

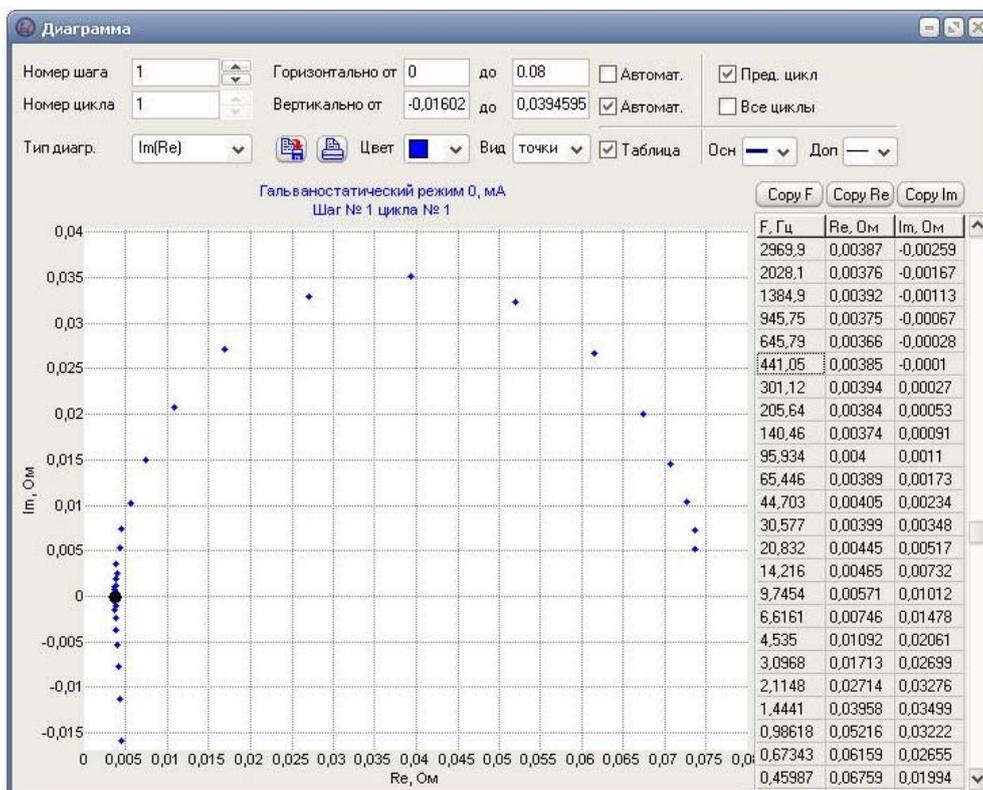


Литиевый аккумулятор в потенциостатическом режиме при потенциале близком к ЭДС. Амплитуда переменного сигнала 30 мВ. Интервал рабочих частот от 20 КГц до нижнего предела импедансметра Z-500PRO – 2 миллигерц.

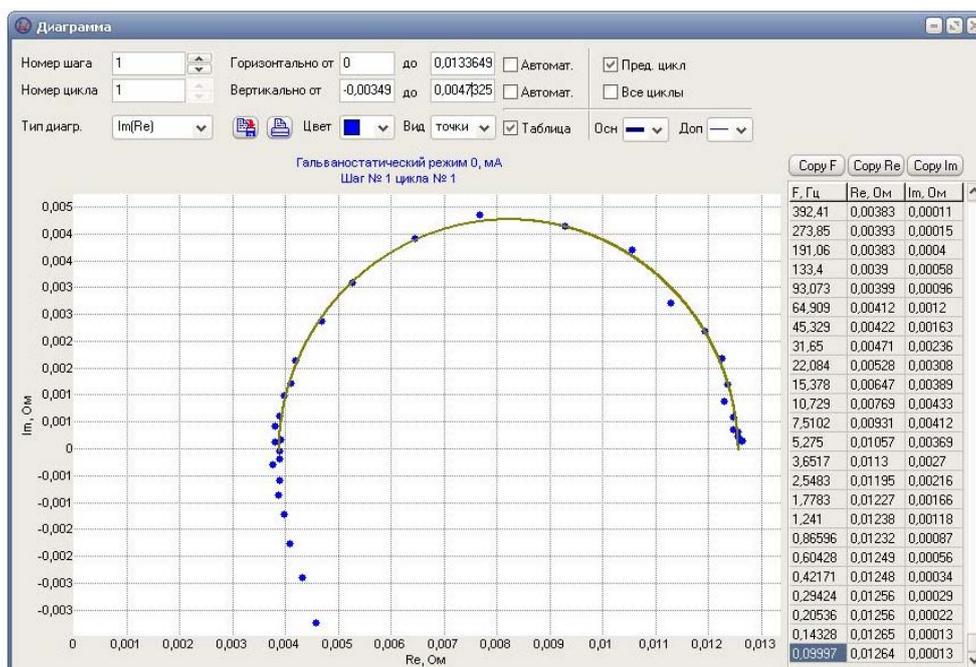


## 7. Модельные RC-цепи, область низких значений импеданса.

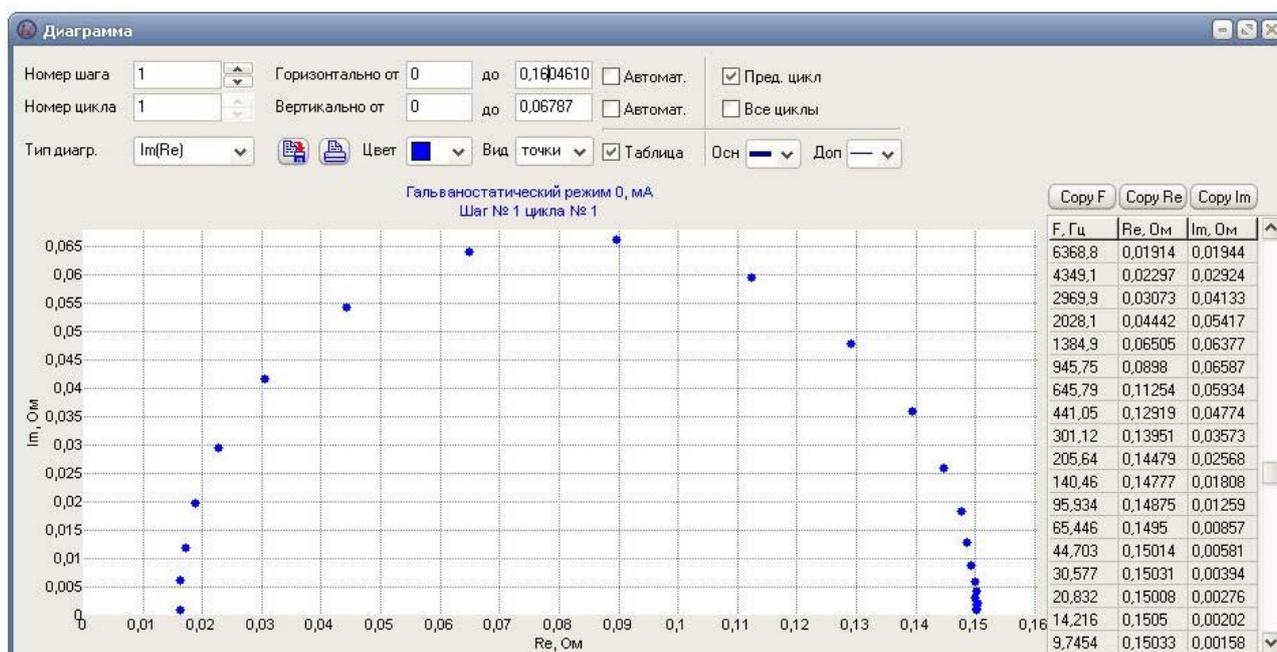
Автомобильный электролитический конденсатор емкостью 1.5 Ф параллельно с двумя проволочными резисторами сопротивлением по 0.15 Ом каждый (переменный ток 200 мА):



Тот же конденсатор параллельно с медным проводом для имитации малого постоянного сопротивления (переменный ток 500 мА). Обратите внимание на изменение величины высокочастотной отсечки на действительной оси из-за изменения точки крепления потенциальных измерительных проводов на исследуемом объекте. Конечный результат – например, омическое сопротивление ХИТ, от этого изменилось бы на 20%!:

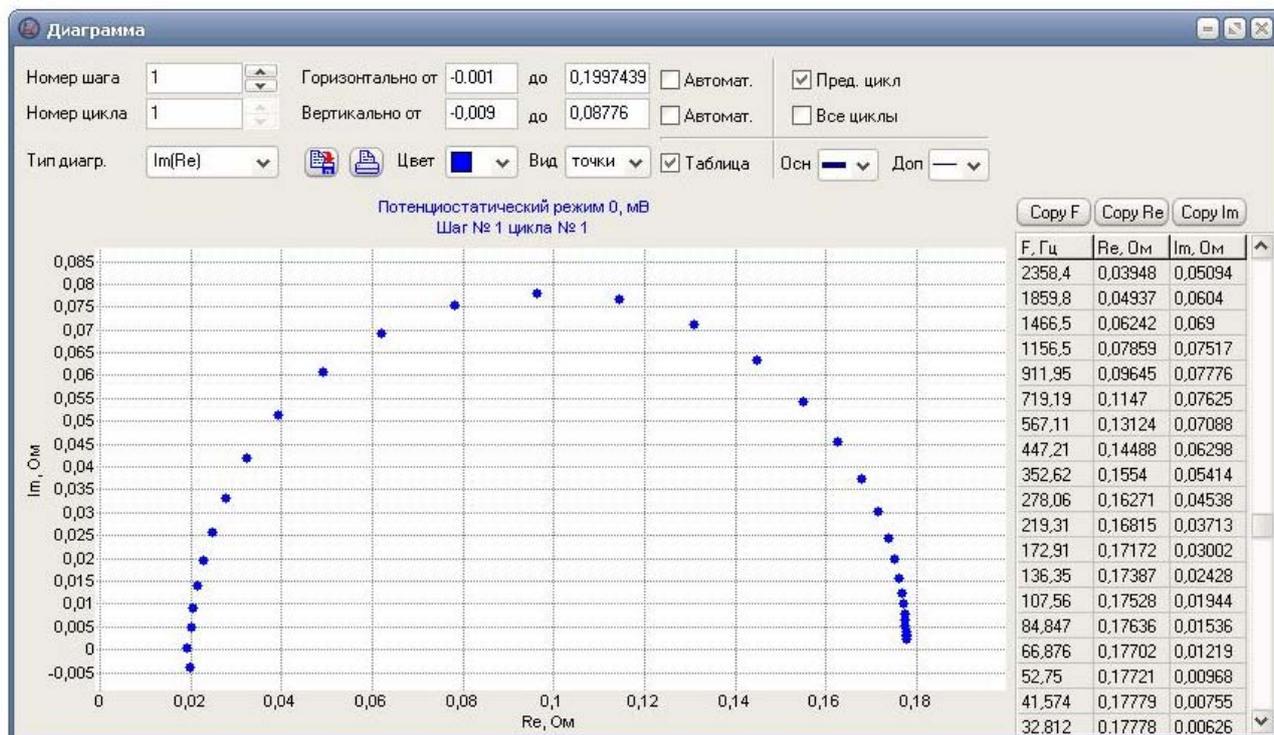


Электролитический низкоимпедансный конденсатор параллельно с проволочным резистором 0.15 Ом (переменный ток 200 мА). Четырехточечное подключение:

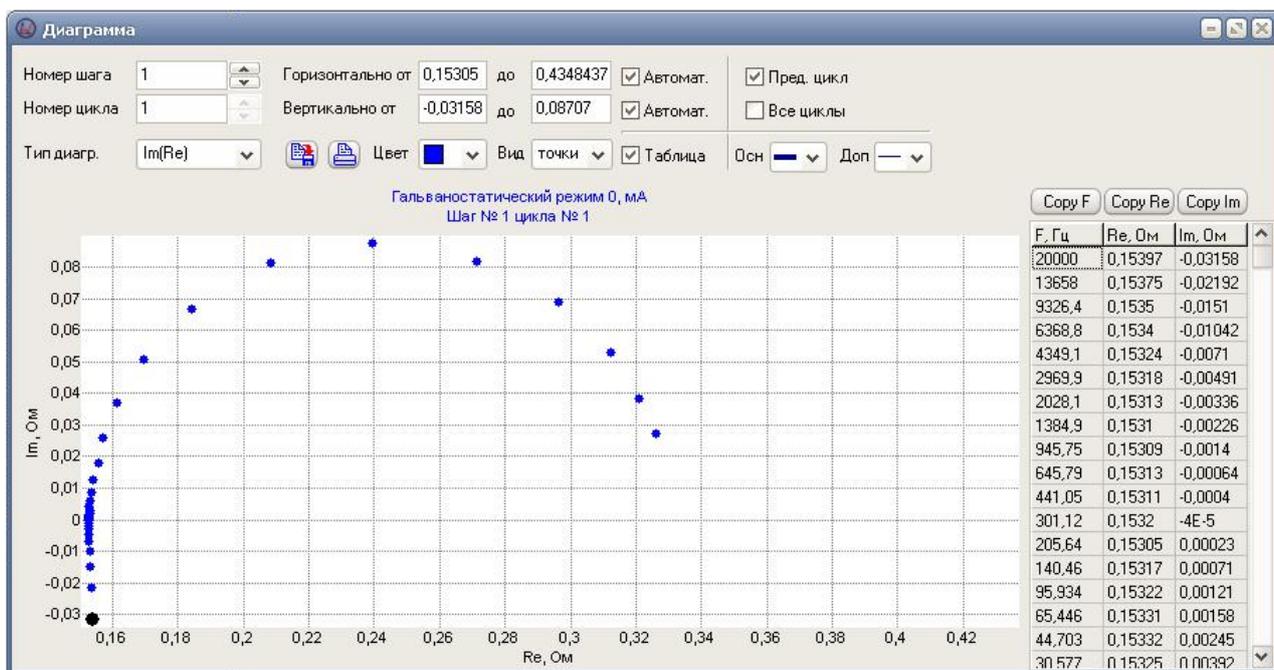


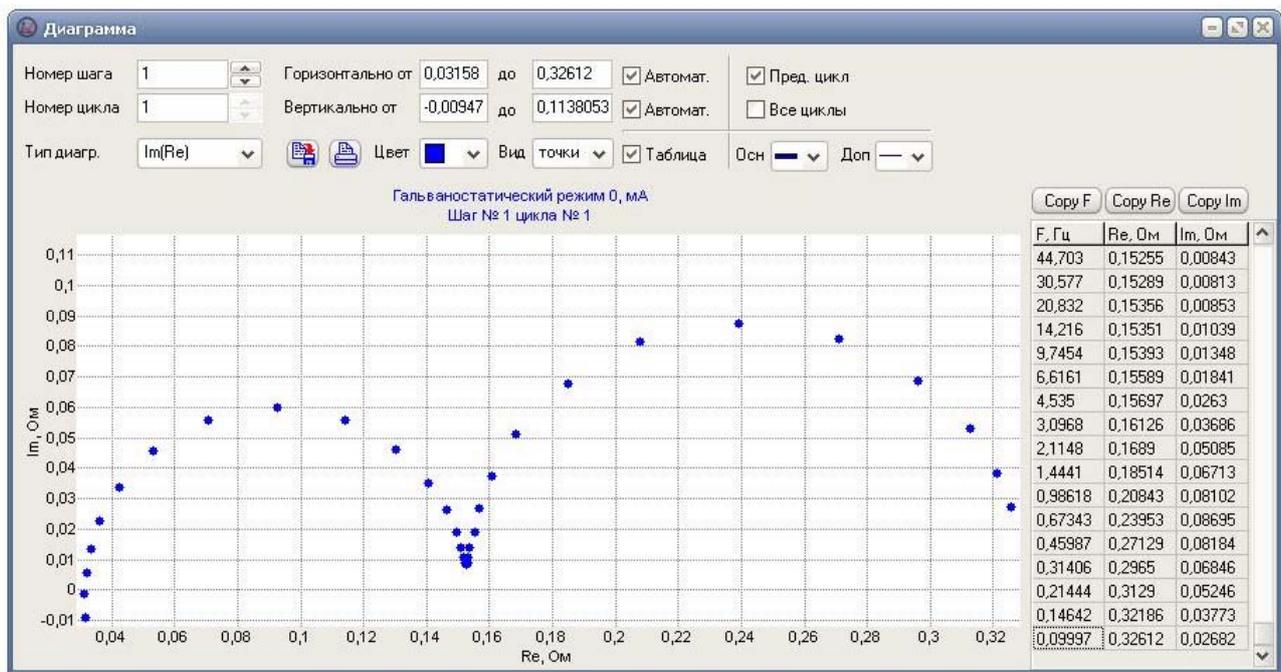
Электролитический низкоимпедансный конденсатор параллельно с проволочным резистором 0.18 Ом. Потенциостатический режим, амплитуда переменного напряжения 30 мВ. Двухточечное подключение – потенциальные измерительные провода подключены не между соответствующими токовыми и исследуемым объектом, а на крокодилы токовых электродов. Высокочастотная отсечка на действительной оси в результате сместилась в сторону больших значений

(что заметно исказило бы эксперимент, если бы задача была в измерении, например, омического сопротивления ХИТ):



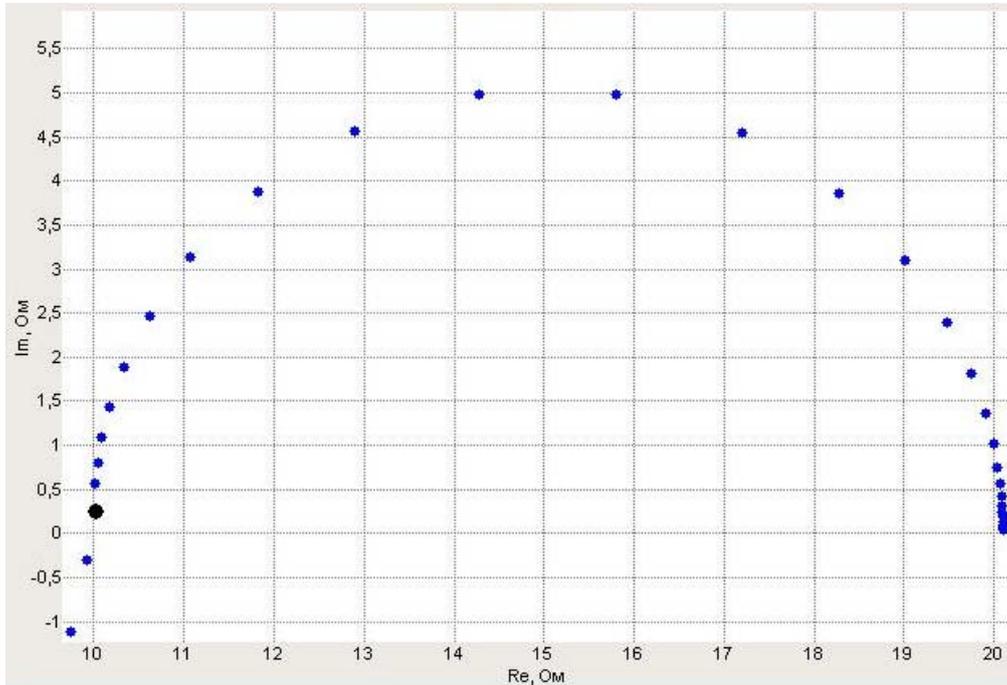
Несколько несложных низкоомных RC-цепей на основе электролитического конденсатора и проволочных резисторов (гальваностатический режим, амплитуда 200 мА):



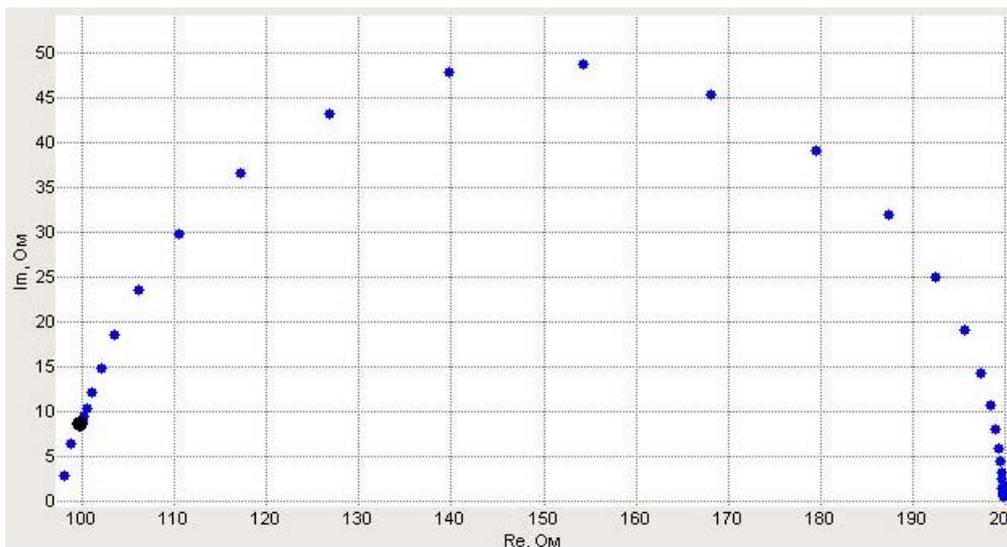


## 8. Модельные RC-цепи область средних значений импеданса.

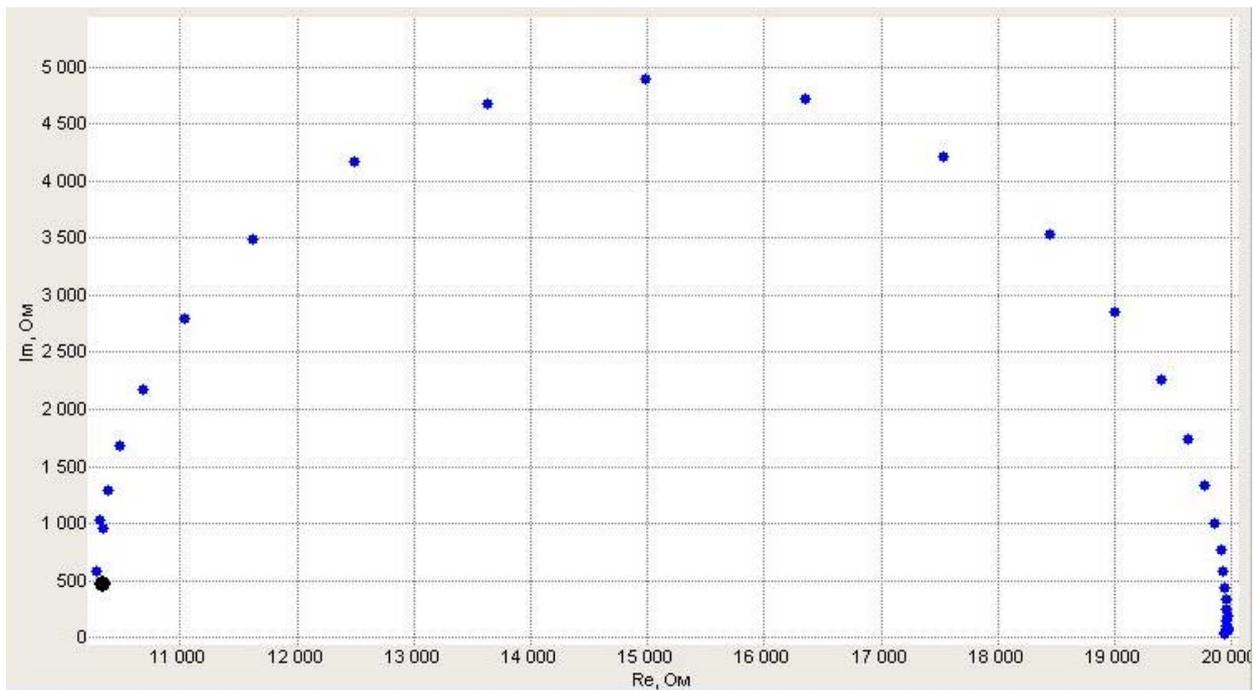
Модельная RC-цепь №1 из эталона, входящего в штатную комплектацию прибора (1 МГц, амплитуда – 250 мВ, жирной точкой выделена частота 550 КГц):



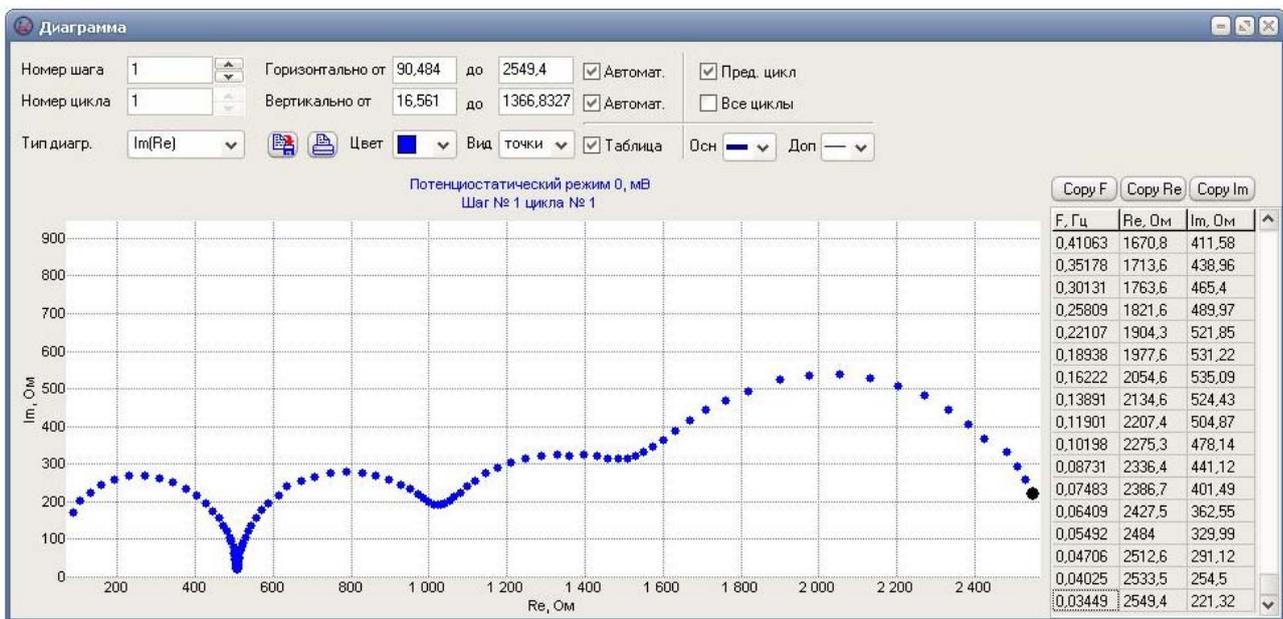
Модельная RC-цепь №2 из эталона, входящего в штатную комплектацию прибора (1 МГц, амплитуда- 250 мВ, жирной точкой выделена частота 550 КГц):



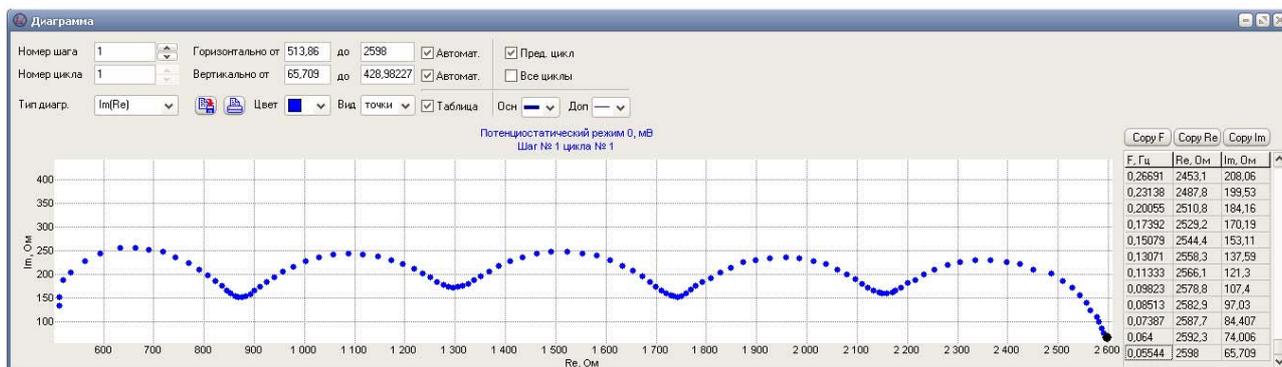
Модельная RC-цепь №3 из эталона, входящего в штатную комплектацию прибора (0.5 МГц, амплитуда- 250мВ):



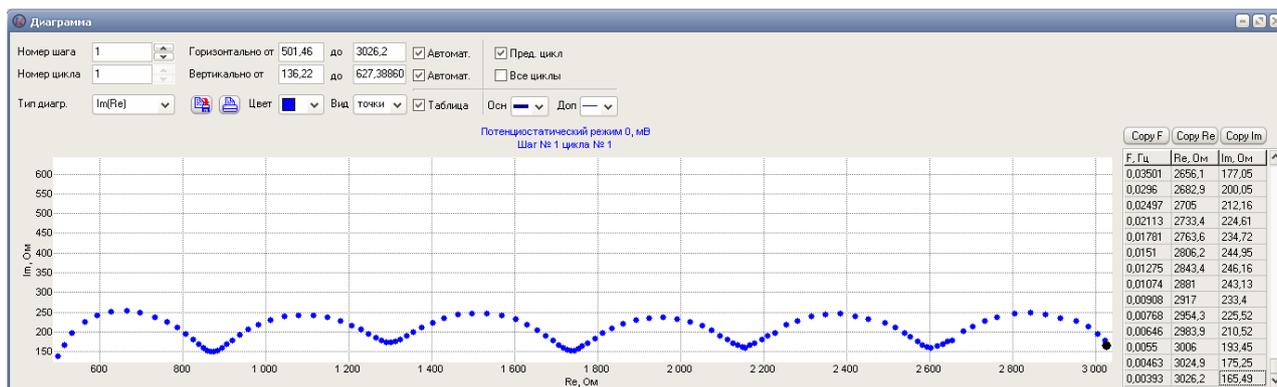
Сложная демонстрационная RC цепь (1 МГц-33 мГц, амплитуда - 250 мВ):



RC цепь с пятью последовательными RC – контурами (резисторы 430 Ом, конденсаторы от 1 нФ до 100 мкФ), частотный интервал от 1 МГц до 5.5 мГц, амплитуда 100 мВ:



RC цепь с шестью последовательными RC – контурами (резисторы 430 Ом, конденсаторы от 1 нФ до 33000 мкФ), частотный интервал от 1 МГц до 4 мГц, амплитуда 100 мВ:



Аккуратный промер низкочастотной области. Демонстрирует точность работы блока частотного анализа при заметном фазовом сдвиге – в большинстве предыдущих модельных примеров в субнизкочастотной области он был мал, что потенциально могло бы маскировать некоторые типы искажений. Конденсатор 1.5 Ф параллельно с резистором 430 Ом и последовательно с резистором 51 Ом, амплитуда 100 мВ:

