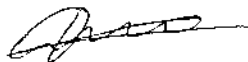


РГБ ОД

13 ИЮН 2000

На правах рукописи



Фадеева Нариса Владимировна

**БЫСТРОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ИМПИТАНСА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ В ПРИСУТСТВИИ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ
АДДИТИВНОЙ ПОМЕХИ**

Специальность 05.12.21. - Радиотехнические системы специального назначения, включая технику СВЧ и технологию их производства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск - 2000

Работа выполнена в Новосибирском государственном техническом университете.

Научный руководитель

доктор технических наук,
профессор Новицкий С.П.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор Миценко И.Д.
кандидат технических наук,
профессор Дмитриев А.Я.

Ведущая организация: Конструкторско - технологический институт
вычислительной техники СО РАН (г. Новосибирск)

Защита состоится "21" 06 2000 г. в 10⁰⁰ часов
на заседании диссертационного совета Д 063.34.06
в Новосибирском государственном техническом университете по адресу:
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Новосибирского государственного технического университета

Автореферат разослан "15" июня 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Востретцов А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Метод измерения иммитанса (импеданса и адмиттанса) получил широкое распространение в практике научных исследований, например при изучении свойств электрохимических (ЭХО), медико-биологических, геофизических и других исследуемых объектов (ИО). Использование стандартных приборов, предназначенных для измерения иммитанса электро- и радиоэлементов, мало перспективно для указанных объектов из-за не учета их специфических особенностей. Так при проведении измерений иммитанса электрохимических объектов необходимо учитывать следующие особенности:

- из-за нестабильности во времени параметров исследуемых объектов измерения должны выполняться с высоким быстродействием (в частности, время одного измерения в области низких и инфранизких частот (ИНЧ) не должно превышать одного - трех периодов воздействующего на исследуемый объект гармонического сигнала);

- измеритель должен обеспечивать поддержание на определенных электродах ЭХО требуемого режима поляризации (постоянного и/или линейно изменяющегося напряжения или тока), поэтому в измерительной цепи наряду с измеряемым сигналом присутствует аддитивная помеха, что осложняет процесс измерения;

- при переключении рабочей частоты, смене режима поляризации или уровня поляризующего сигнала, смене предела измерений, т.е. при наличии каких -либо изменений в воздействующем сигнале, в измерительной цепи возникает переходный процесс, свободная составляющая которого по отношению к измеряемому сигналу является сложной аддитивной помехой; её влияние на результаты измерений должно быть сведено к минимуму, не дожидаясь окончания переходного процесса (по крайней мере, в области ИНЧ);

- ЭХО имеют существенно нелинейную вольт-амперную характеристику; для сохранения линейных свойств ИО в заданной точке измерительного режима необходимо, чтобы амплитуда гармонической составляющей измерительного сигнала на исследуемом участке ЭХО не превышала единиц милливольт; т.е. измерения иммитанса ЭХО проводятся при малых отношениях сигнал/шум;

- достаточно полную информацию о свойствах ЭХО можно получить при выполнении измерения иммитанса в широкой области частот (10^{-4} Гц ÷ 10^7 Гц).

Учёт приведенных выше факторов обусловил создание специализированного измерителя иммитанса ЭХО и синтез алгоритмов обработки экспериментальных данных, обеспечивающих получение результатов, инвариантных к аперриодическим аддитивным помехам.

Цель работы и задачи исследования. Исследование и разработка методов и устройств быстрого измерения иммитанса ЭХО при обеспечении требуемого режима поляризации на границе рабочий электрод - электролит или поддержании ЭХО в равновесных условиях.

Исходя из цели работы, задачами исследования являлись:

1. Анализ специфических особенностей измерения и интерпретации частотных зависимостей иммитанса ЭХО и формулирование требований к методам и средствам измерения иммитанса ЭХО.

2. Разработка быстродействующих прецизионных измерительных преобразователей иммитанса - гармонический сигнал, обеспечивающих требуемый режим поляризации ИО или поддержания ИО в равновесных условиях.

3. Синтез алгоритмов методов быстрого раздельного измерения параметров гармонической составляющей, инвариантных к сложной аддитивной помехе, однозначно характеризующих компоненты иммитанса ЭХО, и сравнительный анализ погрешностей этих методов.

4. Разработка на основе синтезированных методов принципов построения векторно-скалярных преобразователей (ВСП) и сравнительный анализ их точностных характеристик.

5. Создание на основе предложенных методов и принципов быстродействующего измерителя иммитанса ЭХО и экспериментальное исследование его метрологических характеристик и функциональных возможностей, разработка рекомендаций по его использованию в практике научных исследований.

Методы исследований. В диссертации приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные с использованием теории линейных электрических цепей, теории измерений, методов вычислительной математики и машинного моделирования, преобразований Фурье и линейной алгебры.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Обоснование основных технических требований и обобщенная структурная схема быстродействующего измерителя иммитанса ЭХО, инвариантно к сложной аддитивной помехе.

2. Способы построения быстродействующих прецизионных измерительных преобразователей (ИП) иммитанса - напряжение, обеспечивающих поляризацию ИО заданным током или потенциалом и формирование сигнала, гармоническая составляющая которого прямо пропорциональна измеряемому иммитансу.

3. Способы построения ИП иммитанса - напряжение для работы в равновесных условиях, обеспечивающие высокую точность преобразования.

4. Способ построения широкополосных высокочастотных ИП импеданса - напряжение (работающих в области средних и высоких частот $0.1 \div 10$ МГц) с преобразованием измерительных сигналов, несущих информацию об измеряемом импедансе, в сигналы с фиксированной промежуточной частотой и поддержанием на ЭХО потенциостатического режима поляризации.

5. Алгоритмы новых методов и реализованные на их основе устройства с n -кратной селективной дискретизацией (СД), n -полупериодным фазочувствительным детектированием (ФЧД) отклика сигнала, а также с получением взаимокорреляционной функции (ВКФ) на n полупериодах сигнала воздействия и отклика для быстрых (не более трех периодов гармонического измерительно-

го сигнала в области ИНЧ) векторно-скалярных преобразований (ВСП), инвариантных к наличию в измеряемом сигнале первых $(n-1)$ слагаемых сложной аддитивной помехи, при разложении ее в степенной ряд (где n - число полупериодов измерения), реализованные на базе известных методов СД, ФЧД и ВКФ.

6. Экспериментальные результаты исследования метрологических характеристик быстродействующего измерителя иммитанса ИИМ-2098, построенного на основе метода n -полупериодного ФЧД, созданного совместно с ИХТТМ СО РАН.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способы построения быстродействующих прецизионных ИП иммитанс - напряжение для области ИНЧ, средних и высоких частот, обеспечивающих заданный режим поляризации ИО или равновесные условия, и их технические характеристики.

2. Алгоритмы новых методов с n -кратной селективной дискретизацией, n -полупериодным ФЧД и n -полупериодного корреляционного метода, инвариантных ко всем слагаемым аддитивной помехи, степень переменной в которых не превышает $(n-2)$.

3. Экспериментальные результаты исследования метрологических характеристик быстродействующего измерителя иммитанса ИИМ-2098.

Практическая ценность работы.

1. Разработан измеритель иммитанса ИИМ-2098, внедренный в практику электрохимических исследований в ИХТТМ СО РАН, в котором реализованы и используются предложенные в работе способы и устройства:

- ИП иммитанс - напряжение для исследования ЭХО в равновесных условиях или заданных режимах поляризации (потенцио- гальваностатических, потенцио- гальванодинамических);

- высокочастотный ИП импеданс - напряжение с потенциостатическим режимом поляризации ЭХО;

- алгоритм и устройство быстрой предварительной компенсации преобладающей постоянной составляющей в измеренном сигнале;

- алгоритм и ВСП с n -полупериодным ФЧД.

2. Предложенные в работе способы построения измерительных и векторно-скалярных преобразователей и методы обработки полученных результатов могут быть положены в основу создания новых универсальных интерактивных систем для регистрации и анализа импеданс - вольтамперных характеристик ИО не только в электрохимии, но и в медицине, биологии, геофизике, микроэлектронной и полупроводниковой технике.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на двух Российских и одной международной научно-технических конференциях "Информатика и проблемы телекоммуникаций" (г. Новосибирск, 1996, 1997, 1999) и двух международных научно - технических конференциях "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (г. Новосибирск, 1996, 1998).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них 1 тезисы доклада, 10 статей и 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 107 наименований и приложения. Работа изложена на 153 листах и иллюстрируется 48 рисунками.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, выделены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе рассматриваются особенности электрохимических объектов и требований, предъявляемых к методам и средствам измерения иммитанса.

При измерении иммитанса ЭХО используется электрохимическая ячейка, представляющая собой, в частном случае, сосуд с электролитом, в который погружены рабочий РЭ, вспомогательный ВЭ и сравнивающий ЭС электроды (рис. 1а). Объектом электрохимических исследований является граница РЭ - электролит и протекающие на ней процессы. На рис. 1б приведена эквивалентная схема замещения границы РЭ - электролит при замедленных стадиях разряда, диффузии и адсорбции.

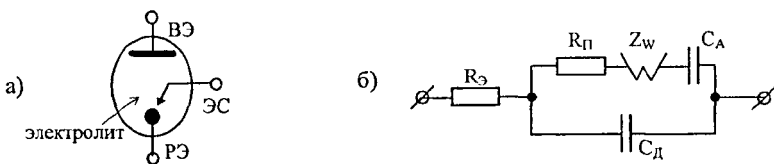


Рис. 1. Электрохимическая измерительная ячейка (а), эквивалентная схема замещения границы РЭ - электролит (б)

ВЭ - вспомогательный электрод, ЭС - электрод сравнения, РЭ - рабочий электрод; $R_{Э}$ - сопротивление электролита, $C_{д}$ - емкость двойного электрического слоя, $R_{п}$ - сопротивление перехода, Z_{w} - импеданс Варбурга, C_{A} - емкость адсорбции

Показано, что при построении быстродействующих измерителей иммитанса ЭХО наиболее целесообразно использовать методы с прямо пропорциональным преобразованием иммитанса ЭХО - гармонический сигнал с последующим раздельным измерением параметров этого сигнала. Предложена обобщенная структурная схема быстродействующего измерителя иммитанса ЭХО, построенного по этому принципу (рис. 2).

Определены основные технические характеристики, которым должна соответствовать измерительная аппаратура для электрохимических исследова-

ний, главными из которых являются: амплитуда гармонического напряжения на ИО - не более 5 мВ; время одного измерения в области ИНЧ - не более трех периодов измерительного сигнала; рабочий диапазон частот $10^{-4} \div 10^7$ Гц; интервал измеряемых импедансов $10^{-2} \div 10^6$ Ом; относительная погрешность измерения искомых компонентов иммитанса $0.3 \div 3$ % при обеспечении необходимых режимов поляризации ИО или равновесных условий.

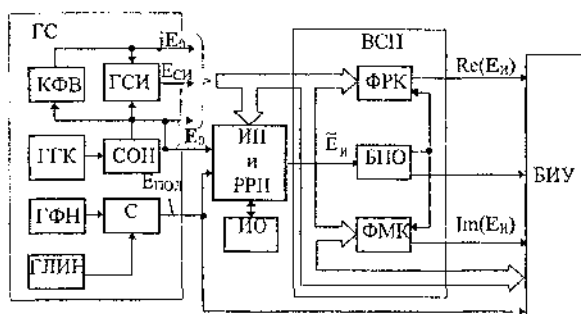


Рис. 2. Обобщенная структурная схема быстродействующего измерителя иммитанса ЭХО

E_0 и jE_0 - опорные сигналы; $E_{сн}$ - последовательность синхроимпульсов; $E_{гн}$ - гармоническая составляющая измеренного сигнала $\tilde{E}_{гн}$; ГС - генератор сигналов, ГГК - генератор гармонических колебаний, ГСИ - генератор синхроимпульсов, КФВ - квадратурный фазовращатель, СОИ - стабилизатор опорного напряжения, ГФН - генератор фиксированных напряжений, ГЛИН - генератор линейно изменяющегося напряжения, С - сумматор, ИП - измерительный преобразователь иммитанс - гармонический сигнал, РПИ - регулятор режима поляризации, ИО - исследуемый объект, ВСП - векторно-скалярный преобразователь, БПО - блок предварительной обработки сигналов; ФРК, ФМК - формирователи реального и мнимого компонентов иммитанса; БИУ - блок индикаторных устройств

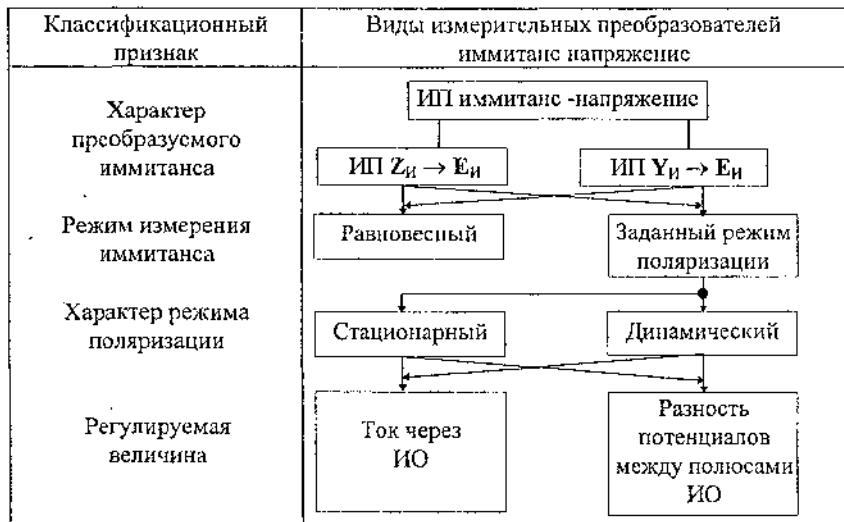
На примере электродного процесса с замедленной стадией разряда определены условия минимального и максимального влияния свободной составляющей переходного процесса на измеряемый сигнал. Показано, что значение приведенной относительной погрешности ВСП при наличии свободной составляющей переходного процесса определяется значением выходного сигнала ВСП от свободной составляющей, приведенной к амплитуде гармонической составляющей сигнала.

Во втором разделе рассматриваются принципы построения измерительных преобразователей иммитанс ЭХО - гармонической сигнал, которые являются одними из наиболее важных узлов измерителей иммитанса, так как их ха-

характеристики определяют основные технические характеристики и функциональные возможности последних.

Таблица 1

Классификация измерительных преобразователей иммитанс - напряжение



Требования высокого быстродействия при построении измерительных преобразователей (ИП), работающих в области ИИЧ, исключает возможность использования известных цепей развязки постоянной и переменной составляющих сигнала на основе фильтров, из-за высокой инерционности последних. В основу построения быстродействующих ИП для этой области частот (рис. 3) могут быть положены устройства без цепей развязки с одноплюсными режимами поляризации ЭХО: по постоянному и переменному току (ключ К на рис. 3 в положении Г) и по постоянному и переменному напряжению (ключ К на рис. 3 в положении П).

Структурная схема ИП адмиттанс - напряжение, построенного по указанному принципу, приведена на рис. 4. Воздействующие гармоническое E_0 и поляризующее E напряжения складываются в сумматоре С и поступают на один из входов дифференциального усилителя ДУ, на второй вход которого поступает сигнал обратной связи $E_{ос}$, снимаемый через повторитель напряжения ПН с участка электрод сравнения ЭС – рабочий электрод РЭ электрохимической ячейки ЭЯ. Рабочий РЭ и вспомогательный ВЭ электроды погружены в исследуемый раствор и разделены пористой диафрагмой Д. Наличие диафрагмы препятствует попаданию продуктов реакции, образующихся на ВЭ при протекании тока поляризации, в основной объем ячейки, где производятся из-

мерение сигнала \tilde{E}_{OC} . На входе генератора тока ГТ снимается информационный сигнал

$$\tilde{E}_{и} = \tilde{I}_{и} / K_{ГТ} = \frac{(E_0 Y_{и} + E G_{и})}{K_{ГТ}} = K_{и} Y_{и} + K_{и} G_{и} = E_{и} + E, \quad (1)$$

(где $K_{и} = E_{и} / K_{ГТ}$, $K_{и} = E / K_{ГТ}$, $Y_{и}$ – адмиттанс исследуемой электродной границы, $G_{и}$ – проводимость границы для постоянной составляющей тока $I_{и}$), гармоническая составляющая которого $E_{и}$, прямо пропорциональна измеряемому адмиттансу $Y_{и}$.

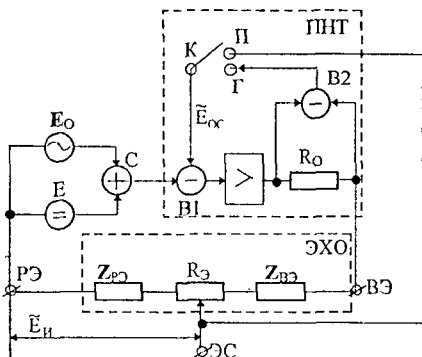


Рис. 3. Обобщенная структурная схема ИП иммитанс - напряжение E_0 и E - гармоническое и поляризирующее напряжения; C - сумматор, $B1$ и $B2$ - вычитатели, K - ключ, Γ и Π - режим поляризации ИО соответственно гальваностатический или потенциостатический, ПНТ - преобразователь напряжение - ток, ЭХО - исследуемый электрохимический объект (см. рис. 1): $Z_{pЭ}$ и $Z_{вЭ}$ - импедансы рабочего и вспомогательного электродов, $R_{Э}$ - сопротивление электролита; R_0 - образцовый резистор

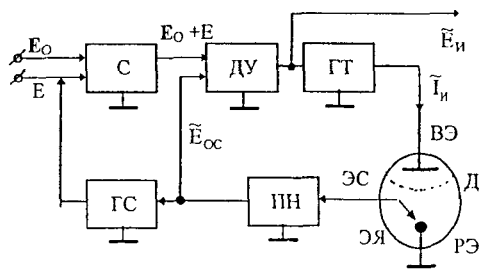


Рис. 4. Структурная схема ИП адмиттанс - напряжение с поляризацией ЭХО заданным потенциалом

Наличие в ИП генератора сигнала ГС (см. рис. 4) позволяет использовать эту схему и при поддержании равновесных условий измерения. С этой целью вначале в ГС производится измерение потенциала РЭ относительно электрода сравнения ЭС, затем полученное значение запоминается в ГС и подается на вход Е ИП.

При исследованиях метрологических параметров ИП определялись уровень выходных шумов и основные погрешности преобразования, а также меры по их уменьшению. Установлено, что уровень шумов ИП зависит от типа преобразования (адмиттанс - напряжение или импеданс - напряжение) и от характера реактивности иммитанса ИО, вследствие чего в области ИЧ наименьшими шумами обладают ИП адмиттанс - напряжение индуктивных объектов и ИП импеданс - напряжение - емкостных. В результате анализа погрешностей регулирования и частотных погрешностей ИП показано, что значение этих погрешностей обратно пропорционально коэффициентам передачи активных элементов ИП с разомкнутой обратной связью (повторителя напряжения, сумматоров и др.) и прямо пропорционально отношению импеданса ИО $Z_{И}$ к значению сопротивления образцового элемента R_0 (рис. 5).

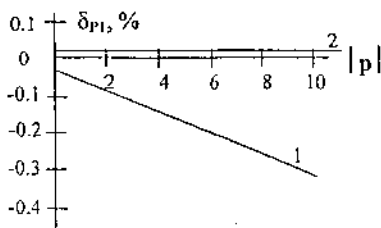


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности регулирования ИПИИ (рис. 4) от отношения $|p| = Z_{И}/R_0$, без коррекции (1) и с коррекцией коэффициента передачи усилителя (2)

тот, обусловленные наличием в ИП паразитных импедансов соединительных кабелей и цепей поляризации; предложены некоторые пути построения ИП, позволяющие или их скомпенсировать, или же полностью исключить влияние отдельных мешающих паразитных параметров на точность преобразования.

В третьем разделе рассматриваются методы быстрого раздельного измерения компонентов гармонической составляющей СЭС, характеризующих иммитанс ИО.

Выходной сигнал ИП в общем случае - сложный электрический сигнал

$$\tilde{e}_И = \tilde{e}_{И1} + c_{И}, \quad (2)$$

Предложен принцип построения широкополосных высокочастотных ИП импеданс - напряжения (работающих, в частности, в области средних и высоких частот $0.1 \div 10$ МГц) с преобразованием измерительных сигналов, несущих информацию об измеряемом импедансе в сигналы с фиксированной промежуточной частотой, обеспечивающих поддержание на ЭХО потенциостатического режима поляризации (рис. 6).

Рассмотрены погрешности такого ИП в рабочей области частот,

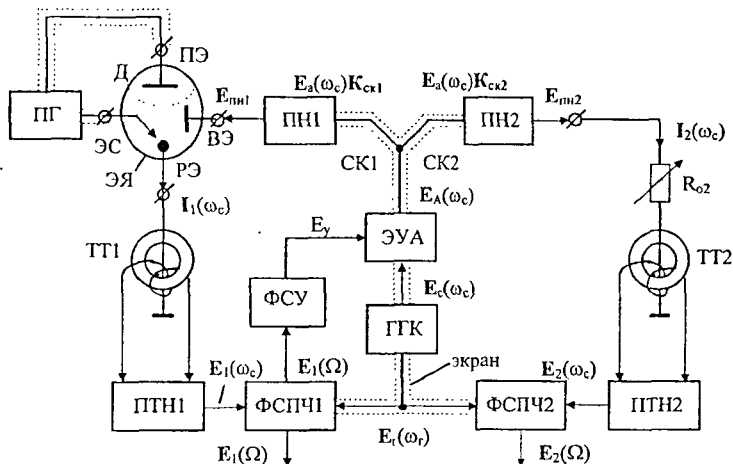


Рис. 6. Функциональная схема высокочастотного измерительного преобразователя импеданс - гармоническое напряжение

ПГ - потенциостат - гальваностат, ПН - повторитель напряжения, ЭУА - электронно-управляемый аттенуатор, ФСУ - формирователь сигнала управления, ТТ - трансформатор тока, ГК - генератор гармонического колебания, ПТН - преобразователь ток - напряжение, ФСПЧ - формирователь сигнала промежуточной частоты

где $e_n = E_{им} \cos(\omega t - \varphi)$ - гармоническая составляющая, компоненты которой прямо пропорциональны компонентам измеряемого иммитанса ЭХО, $\tilde{e}_n = e_{ш} + e_n + e_{пол} + e_{св}$ - сложная аддитивная помеха, здесь $e_{ш}$ и e_n - напряжения шумов и наводок, $e_{пол} = E + vt$ - сигнал поляризации, где E - постоянная составляющая и vt - линейно изменяющаяся составляющая (здесь v - скорость изменения поляризующего напряжения), $e_{св}$ - свободная составляющая переходного процесса. Предложен метод, позволяющий в установившемся режиме измерить постоянную составляющую E выходного сигнала ИП \tilde{e}_n , переменная составляющая которого представлена рядом Фурье, за время, не превышающее периода воздействующего сигнала. Так, например, если выходной сигнал \tilde{e}_n представлен постоянной составляющей и суммой нечетных гармоник, то он имеет вид

$$\tilde{e}_n = E + e_n = E + \sum_{k=1}^{\infty} E_{им_k} \sin(k\omega t - \varphi_k), \quad (3)$$

где $k = 1, 3, 5, \dots$; $E_{им_k}$ - амплитуда k -ой гармонической составляющей сигнала

e_H ; ω - круговая частота; φ_k - фазовый сдвиг k -й гармоники относительно опорного (воздействующего) сигнала $e_0 = E_{Om} \sin \omega t$. Сигнал \tilde{e}_H дискретизируется через половину периода опорного сигнала. Среднее значение двух ближайших выборок (отсчетов) сигнала \tilde{e}_H будет равно

$$0.5(\tilde{e}_H|_{t=0} + \tilde{e}_H|_{t=T/2}) = 0.5 \left[E + \sum_{k=1}^{\infty} E_{Hm_k} \sin(k\omega \cdot 0 - \varphi_k) + E + \sum_{k=1}^{\infty} E_{Hm_k} \sin(k\omega \cdot T/2 - \varphi_k) \right] = E, \quad (4)$$

где T - период гармонической составляющей. Если из (4) вычесть (3), то получим значение гармонической составляющей

$$e_H = \sum_{k=1}^{\infty} E_{Hm_k} \sin(\omega t - \varphi_k) \Big|_{t=2T/2, k=1, 3, 5, \dots}$$

Используя метод суперпозиции, легко показать, что данный метод может быть использован и когда сигнал \tilde{e}_H представлен рядом Фурье с четными гармониками.

При наличии в сигнале постоянной составляющей, т.е. когда $\tilde{E}_H = E + E_H$ (рис. 7а), можно, используя метод селективной дискретизации СЭС, достаточно быстро определить параметры гармонической составляющей. Для этого, в моменты перехода через ноль опорных сигналов $e_0 = E_{Om} \cos \omega t$ и $je_0 = E_{Om} \sin \omega t$ (рис. 7в, г), определяются значения выборок сигнала \tilde{E}_H :

$$\left. \begin{aligned} E_{A|t=0} &= E + E_{Hm} \cos \varphi, & E_{B|t=T/4} &= E + E_{Hm} \sin \varphi, \\ E_{C|t=T/2} &= E - E_{Hm} \cos \varphi, & E_{D|t=3T/4} &= E - E_{Hm} \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Из полусуммы выборок E_A, E_C или E_B, E_D определяется значение постоянной составляющей E , а полуразность этих выборок:

$$\left. \begin{aligned} 0.5(E_A - E_C) &= E_{Hm} \cos \varphi = E_R \\ 0.5(E_B - E_D) &= E_{Hm} \sin \varphi = E_X \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

определяет соответственно реальный $E_R = \text{Re}(E_H)$ и мнимый $E_X = \text{Im}(E_H)$ компоненты гармонической составляющей E_H измеряемого сигнала \tilde{E}_H .

Если измеряемый сигнал описывается выражением $\tilde{e}_H = E + vt + c_H$ (см. рис. 7б), то значения выборок, взятые в момент перехода через ноль опорных

сигналов $e_0 = E_{0m} \cos \omega t$ и $je_0 = E_{0m} \sin \omega t$ (рис. 7в, г), соответственно равны:

$$\left. \begin{aligned} E_{A|t=0} &= E + E_{\text{Им}} \cos \varphi, & E_{B|t=T/4} &= E + v \frac{T}{4} + E_{\text{Им}} \sin \varphi, \\ E_{C|t=T/2} &= E + v \frac{T}{2} - E_{\text{Им}} \cos \varphi, & E_{D|t=3T/4} &= E + v \frac{3T}{4} - E_{\text{Им}} \sin \varphi, \\ E_{A|t=T} &= E + vT + E_{\text{Им}} \cos \varphi, & E_{B|t=5T/4} &= E + v \frac{5T}{4} - E_{\text{Им}} \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Искомые значения реального и мнимого компонента гармонической составляющей $E_{\text{И}}$ сигнала $\tilde{E}_{\text{И}}$ получим, если полученные выборки (7) обработаем по следующему алгоритму:

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}(E_{\text{И}}) &= \frac{1}{4}(E_A - 2E_C + E'_A) = E_{\text{Им}} \cos \varphi = E_{\text{R}} \\ \text{Im}(E_{\text{И}}) &= \frac{1}{4}(E_B - 2E_D + E'_B) = E_{\text{Им}} \sin \varphi = E_{\text{X}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

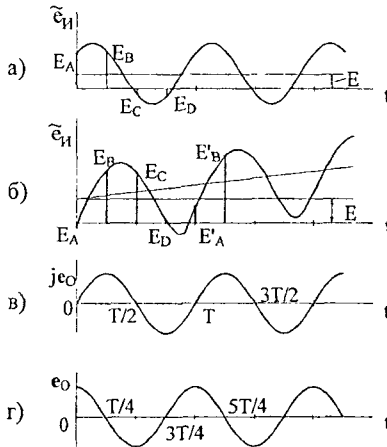


Рис. 7. Диаграммы сигналов, поясняющие измерения параметров гармонической составляющей СЭС при наличии в нем постоянной и линейно изменяющейся составляющих методами селективной дискретизации

$E_A, E_B, E_C, E_D, E'_A, E'_B$ - выборки текущего значения СЭС $\tilde{E}_{\text{И}}$, E - постоянная составляющая, e_0 и je_0 - опорные сигналы

Известно, что сложная аддитивная помеха может быть описана степенным рядом, например рядом Тейлора n -й степени:

$$\tilde{e}_{11}(t) = e_n(0) + \frac{e'_n(0)}{1!}t + \frac{e''_n(0)}{2!}t^2 + \dots + \frac{e^{(n)}_n(0)}{n!}t^n = \sum_{j=0}^n a_j t^j. \quad (9)$$

Предложенные ВСП на основе методов с n -кратной селективной дискретизацией, n -полупериодным ФЧД и n -полупериодной корреляционной обработкой сигнала, позволяют исключить влияние $(n-1)$ слагаемых сложной аддитивной помехи вида (9) на погрешность измерения. Алгоритмы этих методов определяются выражениями:

- для ВСП с n -кратной селективной дискретизацией сигнала

$$L_1^a = \begin{cases} L_{1c}^n = \operatorname{Re}(\tilde{E}_n) = \frac{1}{2^{(n-1)}} \sum_{i=0}^{n-1} K_{(n-1)}^i E_{Ri} \\ L_{1k}^n = \operatorname{Im}(\tilde{E}_n) = \frac{1}{2^{(n-1)}} \sum_{i=0}^{n-1} K_{(n-1)}^i E_{Xi} \end{cases}, \quad (10)$$

где L_1^n - символ, обозначающий ВСП с n -кратной селективной дискретизацией сигнала, при этом подиндекс "1" указывает на вид ВСП, а n - число выборок сигнала; здесь и далее подиндексы "с" и "к" у символа L соответствуют синфазному и квадратурному ВСП сигнала \tilde{E}_n , $K_{(n-1)}^i$ - значение i -го от начала разложения члена (с учетом знака) коэффициента бинома Ньютона $(1 - K)^{(n-1)}$, T - период опорного сигнала. Следует отметить, что алгоритмы (6) и (8) являются частными случаями алгоритма (10);

- для ВСП с n -полупериодным ФЧД сигнала

$$L_2^n = \begin{cases} L_{2c}^n = \operatorname{Re}(\tilde{E}_n) = \frac{1}{2^{(n-1)}T} \sum_{i=0}^{n-1} K_{(n-1)}^i \int_{b_{ci}T}^{(b_{ci}+1/2)T} \tilde{E}_n(t) dt \\ L_{2k}^n = \operatorname{Im}(\tilde{E}_n) = \frac{1}{2^{(n-1)}T} \sum_{i=0}^{n-1} K_{(n-1)}^i \int_{b_{ki}T}^{(b_{ki}+1/2)T} \tilde{E}_n(t) dt \end{cases}, \quad (11)$$

где символом L_2^n обозначено ВСП с n -полупериодным ФЧД, $b_{ci} = 0, 1/2, 1, \dots$; $b_{ki} = 1/4, 3/4, 5/4, \dots$;

- для ВСП с фазодетерминированной n -полупериодной корреляционной обработкой сигнала

$$L_3^n = \begin{cases} L_{3c}^n = \operatorname{Re}(\tilde{E}_H) = \frac{1}{2^{(n-1)T}} \sum_{i=0}^{n-1} K_{(n-1)}^i \int_{b_{c_i+1/2}T}^{(b_{c_i+1/2}+1/2)T} \tilde{E}_H(t) \cos \omega t dt \\ L_{3k}^n = \operatorname{Im}(\tilde{E}_H) = \frac{1}{2^{(n-1)T}} \sum_{i=0}^{n-1} K_{(n-1)}^i \int_{b_{k_i}T}^{(b_{k_i+1/2}+1/2)T} \tilde{E}_H(t) \sin \omega t dt \end{cases}, \quad (12)$$

здесь символом L_3^n обозначено ВСП с фазодетерминированной n -полупериодной корреляционной обработкой.

Проведен анализ погрешностей измерения гармонической составляющей СЭС предложенных ВСП L_1^n , L_2^n и L_3^n по сравнению с классическим корреляционным методом $L_{3,N}^1$ ($N = n/2$ - число периодов преобразования), при наличии в измеряемом сигнале свободной составляющей переходного процесса, т.е. когда $\tilde{e}_H = e_H - \exp(-t/\tau)$ (τ - постоянная времени переходного процесса) (см. рис. 8 - 11).

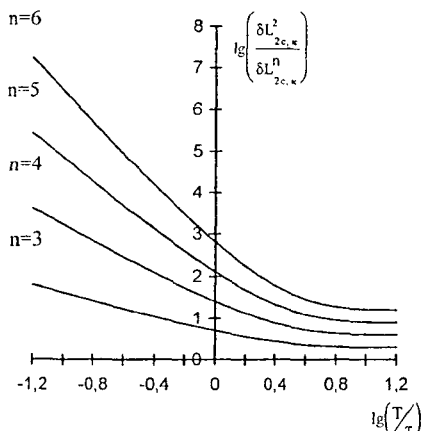


Рис. 8. Выигрыш в точности определения синфазного и квадратурного компонентов гармонической составляющей E_H СЭС \tilde{E}_H при использовании n -полупериодного ФЧД $L_{2c,k}^n$ (при $n = 3, 4, 5, 6$) в сравнении с двухполупериодным методом ФЧД $L_{2c,k}^2$

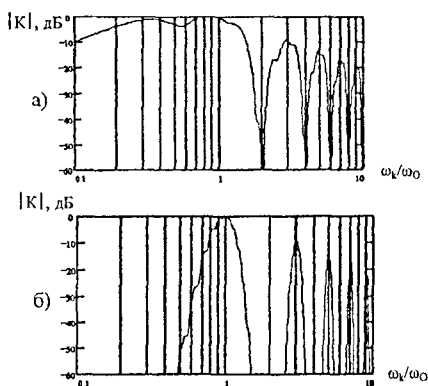


Рис. 9. Нормированные по частоте графики степени подавления неосновных гармоник от их частоты при варьировании количества полупериодов n ФЧД. $|K|$ - степень подавления, ω_0 - частота первой гармоники, ω_k - частота k -й гармоники $n=2$ (а), $n=10$ (б)

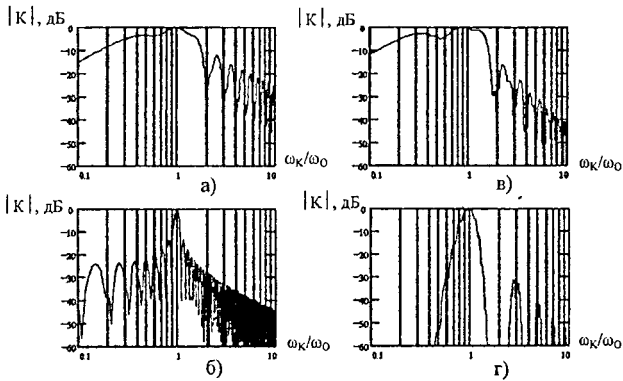


Рис. 10. Нормированные по частоте графики степени подавления неосновных гармоник от их частоты при варьировании количества полупериодов n интегрирования в ВСП L'_3 (а), (б) и ВСП L''_3 (в), (г). $|K|$ - степень подавления, ω_0 - частота первой гармоники, ω_k - частота k -й гармоники. $n=2$ (а) и (в), $n=10$ (б) и (г)

На рис. 11 эффективность предложенных методов ВСП показана как отношение относительных погрешностей ВСП с классической корреляционной обработкой сигнала $\delta L'_{3,N}$ к погрешности предложенного метода ВСП $\delta L''_3$ (кривые 1 - $\delta L'_{3,2} / \delta L''_3$, 2 - $\delta L'_{3,2} / \delta L''_2$, 3 - $\delta L'_{3,2} / \delta L''_3$ при времени ВСП сигнала \tilde{t}_H $t_H = 2T$; кривые 4 - $\delta L'_{3,3} / \delta L''_3$, 5 - $\delta L'_{3,3} / \delta L''_2$, 6 - $\delta L'_{3,3} / \delta L''_3$ при времени ВСП $t_H = 3T$; t_3 - время задержки ВСП от начала переходного процесса).

В четвертом разделе предложено устройство для быстрого измерения и полной компенсации постоянной составляющей СЭС, реализующего метод, рассмотренный в разделе 3 (см. (4)). Быстродействие такого устройства не может превышать половины периода измеряемого сигнала и, следовательно, увеличивается время проведения одного измерения, что особенно заметно в области низких и инфранизких частот. Поэтому, для уменьшения времени компенсации постоянной составляющей, предлагается устройство для быстрой, хотя и неполной компенсации этой составляющей.

В разделе также рассмотрены обобщенные структурные схемы устройств, реализующих методы n -кратной селективной дискретизации (см. (10)), методы с интегральными преобразованиями: n -полупериодного ФЧД (см. (11)) и n -полупериодный корреляционный метод (см. (12)). Структурная схема устройства, реализующая методы ВСП с интегральными преобразованиями (11) и (12), приведена на рис. 12.

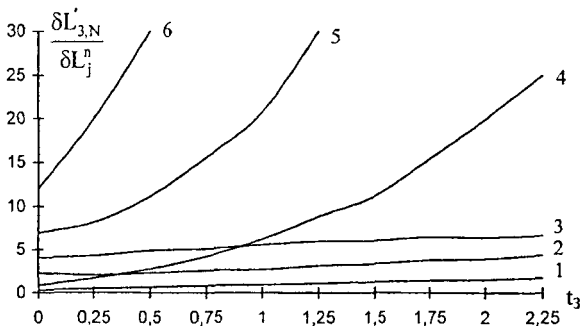


Рис. 11. Выигрыш в подавлении свободной составляющей переходного процесса $e'_{CB}(t) = -\exp(-t/\tau)$ при использовании метода n -кратной селективной дискретизации L_1^n (кривые (1) и (4)), n -полупериодного ФЧД L_2^n (кривые (2) и (5)) и n -полупериодного корреляционного метода L_3^n (кривые (3) и (6)) в сравнении с классическим корреляционным методом $L'_{3,N}$ ($N = n/2$) от длительности задержки t_3 ВСП от начала переходного процесса:

$$\frac{\delta L'_{3,2}}{\delta L_1^4} \text{ (1); } \frac{\delta L'_{3,2}}{\delta L_2^4} \text{ (2); } \frac{\delta L'_{3,2}}{\delta L_3^4} \text{ (3); } \frac{\delta L'_{3,3}}{\delta L_1^6} \text{ (4); } \frac{\delta L'_{3,3}}{\delta L_2^6} \text{ (5); } \frac{\delta L'_{3,3}}{\delta L_3^6} \text{ (6)}$$

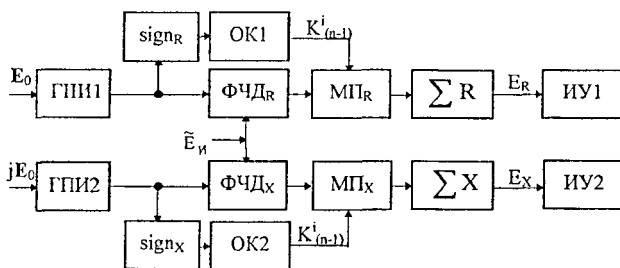


Рис. 12. Схема устройства, реализующего методы с интегральными преобразованиями

ГПИ1,2 - генераторы прямоугольных импульсов; ФЧД_R и ФЧД_X - фазочувствительные детекторы; sign_{R,X} - определители полярности напряжений; ОК1,2 - определители коэффициента бинома Ньютона $K_{(n-1)}^i$; МП_{R,X} - масштабные преобразователи; $\sum R$ и $\sum X$ - сумматоры; ИУ1,2 - индицирующие устройства

Для того, чтобы это устройство обеспечивало реализацию полупериодного корреляционного метода, необходимо вместо фазочувствительных детекторов поставить корреляторы, а также отпадает необходимость в устройствах, определяющих полярность входных напряжений.

Рассмотрены особенности построения и структурная схема измерителя иммитанса ИИМ-2098, построенного на основе n -полупериодного метода ФЧД, экспериментально определены его основные метрологические характеристики.

В качестве примеров использования разработанного измерителя, в работе приведены результаты исследований моногранных серебряных и ионно-металлических твердых электродов.

В заключении сформулированы основные теоретические и практические результаты диссертационной работы, которые состоят в следующем:

1. На основе рассмотрения специфических особенностей и интерпретации результатов измерений иммитанса ЭХО определены основные технические требования к измерительной аппаратуре, применяемой при исследованиях свойств ЭХО импедансным методом.

2. Предложены принципы построения ИП иммитанс - напряжение для работы в области средних частот и ИНЧ, обеспечивающих поляризацию ИО заданным потенциалом, или для работы в равновесных условиях. Рассмотрена связь шумовых характеристик ИП с параметрами ИО, а также зависимость систематических погрешностей ИП от соотношения иммитансов ИО и образцовой меры, от паразитных емкостей и от конечного значения коэффициентов передачи активных элементов ИП. Предложены некоторые пути коррекции и компенсации этих погрешностей, показаны пути уменьшения собственных шумов ИП.

3. Предложен принцип построения широкополосных высокочастотных ИП с преобразованием измерительных сигналов, несущих информацию об измеряемом иммитансе, в сигналы с фиксированной промежуточной частотой, обеспечивающих поддержание на ИО потенциостатического режима поляризации. Рассмотрены погрешности такого ИП в рабочей области частот, обусловленные наличием в ИП паразитных импедансов соединительных кабелей и цепей поляризации; предложены методы учета и коррекции этих погрешностей.

4. Предложены методы и устройства для быстрого измерения и полной компенсации постоянной составляющей СЭС, содержащего постоянную составляющую и периодический сигнал, представленный рядом Фурье, за время, не превышающее длительности периода основной гармоники. Предложены также метод и устройство для компенсации постоянной составляющей СЭС, содержащего постоянную и гармоническую составляющие, до уровня не превышающее амплитуды гармонической составляющей, за время, значительно меньшее ее периода.

5. Предложены методы и устройства быстрого измерения иммитанса при наличии в измеряемом сигнале аддитивных помех, основанные на ВСП с n -кратной селективной дискретизацией, n -полупериодным ФЧД и фазодетерминированном на n полупериодах корреляционном методе, позволяющие исклю-

чить влияния на результаты измерений ($n-1$) слагаемых сложной аддитивной помехи, описываемой степенным рядом, например рядом Тейлора со степенью переменной ($n-2$) включительно.

6. Показано, что ВСП представляют собой возрастающий по эффективности подавления сложной аддитивной помехи, например свободной составляющей переходного процесса, ряд: классический корреляционный метод, метод n -кратной селективной дискретизации, метод n -полупериодного ФЧД и фазодетерминированный на n полупериодах корреляционный метод.

7. На основе метода с n -полупериодным ФЧД разработан быстроедействующий измеритель иммитанса ИИМ-2098, который используется для изучения свойств ЭХО; он также может быть использован для изучения свойств широкого класса объектов: в электро-, радио- и полупроводниковой технике, в геофизике, медицине, биологии и других областях науки и техники.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. Новицкий С.П., Фадеева Л.В. Быстрое измерение импеданса электрофизических объектов с помощью корреляционных методов // Информатика и проблемы телекоммуникаций. Российская науч. - техн. конф.: Тез. докл. - Новосибирск: Изд-во СибГАТИ, 1996. - С. 43.

2. Филатов А.В., Новицкий С.П., Вайс А.А., Фадеева Л.В. Высокочастотный измерительный преобразователь импеданс - напряжение // Измерительная техника. - 1996. - № 8. - С. 54 - 58.

3. Новицкий С.П., Фадеева Л.В. Быстрое измерение импеданса электрофизических объектов методом селективной дискретизации // Тр. третьей Междунар. науч. - техн. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП - 96: В 11 томах. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. - Т. 5. Измерения в радиоэлектронике. - С. 158 - 162.

4. Фадеева Л.В., Новицкий С.П., Белотелов В.В. Сравнительный анализ корреляционных методов измерения импеданса электрофизических объектов // Тр. третьей Междунар. науч. - техн. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП - 96: В 11 томах. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. - Т. 5. Измерения в радиоэлектронике. - С. 163 - 167.

5. Новицкий С.П., Иванчиков И.А., Фадеева Л.В., Филатов А.В. Идентификация структурной схемы электродной границы // Тр. третьей Междунар. науч. - техн. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП - 96: В 11 томах. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. - Т. 9. Проектирование и технология производства РЭС. - С. 63 - 69.

6. Фадеева Л.В., Новицкий С.П. Быстрое измерение импеданса электрофизических объектов методами фазочувствительного детектирования // Информатика и проблемы телекоммуникаций: Материалы Междунар. науч. - техн. конф. - Новосибирск: Изд-во СибГАТИ, 1997. - С. 128.

7. Патент № 2076546. Способ измерения компонентов гармонической составляющей сложного электрического сигнала / Новицкий С.П., Фадеева Л.В. // Открытия. Изобретения. - 1997. - № 9.

8. Новицкий С.П., Фадеева Л.В. Применение корреляционных методов для обработки сигналов при измерении импеданса электрохимических объектов // Метрология. - 1997. - № 7. - С. 20 - 30.

9. Новицкий С.П., Фадеева Л.В., Белогелов В.В., Дегтярь Г.А., Матасов А.Г., Филатов А.В., Кензин В.И., Маслий А.И. Измеритель иммитанса электрофизических объектов, инвариантный к сложной аддитивной помехе // Тр. IV Междунар. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП - 98: В 16 томах. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. - Т. 9. Измерительные приборы и системы. - С. 45 - 52.

10. Новицкий С.П., Фадеева Л.В., Матасов А.Г. Анализ погрешностей методов быстрого измерения иммитанса исследуемых объектов, использующих селективную дискретизацию измерительных сигналов // Тр. IV Междунар. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП - 98: В 16 томах. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. - Т. 9. Измерительные приборы и системы. - С. 53 - 56.

11. Новицкий С.П., Кензин В.И., Фадеева Л.В., Филатов А.В., Матасов А.Г. Измерительные преобразователи иммитанс - электрический сигнал с поляризацией объекта заданным током или потенциалом // Информатика и проблемы телекоммуникаций. Российская науч. - техн. конф.: Материалы конф. - Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 1999. - С. 35 - 36.

12. Новицкий С.П., Фадеева Л.В., Матасов А.Г. Устранение влияния апериодической аддитивной помехи при измерении импеданса исследуемых объектов методом n -полупериодного фазочувствительного детектирования // Метрология. - 1999. - № 1. - С. 28 - 40.

Подписано в печать 5.05.2000.
Тираж 75 экз.

Формат 60×84
Усл. - п.л. 1,08. Печ. л. 1,2.

Бумага офсетная
Заказ № 369

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20