

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики
наименование кафедры

**Измерение длины коаксиальных волноведущих систем
автогенераторным измерительным преобразователем**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ (МАГИСТЕРСКОЙ) РАБОТЫ

Студента (ки) 4 курса 423 группы

направления 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»
код и наименование направления

физического факультета

наименование факультета

Колесова Германа Николаевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

к.ф.-м. н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

М.М. Слепченков

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

О.Е. Глухова

инициалы, фамилия

Саратов 2019 г.

Оглавление

Введение.....	3
Теоретическая часть.	
Способы измерения длины (обнаружения дефектов) коаксиальных волноведущих систем и особенности их применения. Точность методов измерения.....	5
Емкостной метод измерения. Условие квазистационарности.....	5
Эквивалентная схема реального конденсатора.....	6
Точность методов измерения емкости.....	6
Обзор современных измерителей иммитанса.....	8
Метод измерения емкости автогенераторным измерительным преобразователем.....	9
Практическая часть.	
Способы определения емкости кабеля.....	12
Измерение емкости конденсаторов.....	13
Измерение емкости отрезков коаксиальных кабелей.....	15
Вывод.....	16
Заключение.....	17
Список используемой литературы.....	18

Введение

Актуальность. Коаксиальные волноведущие системы являются распространенным средством передачи электрических сигналов. Во многих сферах применения используется коаксиальный кабель:

- Антенно-фидерные тракты
- Системы коммуникации
- Системы связи авиационной и космической техники
- Производственные и научно-исследовательские системы
- Силовая энергетика

В ряде публикаций, посвященных измерению составляющих комплексного сопротивления высокопотерного емкостного датчика [13], а также диффузионной емкости полупроводниковых приборов [7] применяют автогенераторные измерительные преобразователи (АИП). Данные устройства позволяют производить отдельные и независимые преобразования измеренных активной и реактивной составляющих исследуемой цепи (высокопотерного емкостного датчика, канала полевого транзистора и диффузионной емкости р-п-переходов) в амплитуду и частоту гармонических автоколебаний.

Основными преимуществами такого метода измерений являются:

- Отсутствие внешнего источника входного сигнала, посредством которого можно судить о характере комплексного сопротивления исследуемой цепи; исследуемая цепь является составной частью АИП.
- Раздельность измерения составляющих комплексного сопротивления исследуемой цепи (в работе [3] погрешность раздельного измерения составляет не более 2%).
- Высокая разрешающая способность измерения составляющих комплексного сопротивления исследуемой цепи, в частности, высокая чувствительность при измерении реактивной составляющей. В работе [3] описано устройство АИП, чувствительность к изменению емкости которого

составляет величину порядка $0,001\text{пФ}$ в диапазоне значений активной проводимости от 10^{-6} до $2 \cdot 10^{-2}\text{См}$ (от 1Мом до 50Ом).

Благодаря высокой чувствительности АИП к изменению емкости данный метод измерения можно использовать для измерения длины кабеля с высокой точностью по его электрической емкости, а также обнаружения дефектов, в частности, обрыва кабеля.

В данной работе предложен метод измерения длины кабеля и определение места обрыва кабеля с помощью АИП. Получение информации об активной и реактивной (емкости кабеля и проводимости утечки) составляющих кабеля происходит посредством определения частоты и амплитуды автоколебаний АИП. Следует отметить, что измерение длины коаксиальных волноведущих систем посредством АИП ранее не осуществлялось.

Целью данной работы является разработка и экспериментальное исследование автогенераторного измерительного преобразователя (АИП) для измерения длины коаксиальных волноведущих систем.

Теоретическая часть.

Способы измерения длины коаксиальных волноведущих систем.

Существуют различные способы и устройства для определения длины и обнаружения дефектов коаксиальных волноведущих систем [1]:

- *локационный метод*
- *метод колебательного разряда*
- *метод петли*
- *емкостной метод*

Емкостной метод измерения. Среди перечисленных методов на практике широко применяется емкостной метод измерения длины кабеля, который основан на измерении электрической емкости кабеля (емкость между жилами и оплеткой или между жилами кабеля), пропорциональной его длине или длине до места его обрыва. Данный метод зачастую используется при обрыве жил кабеля. Измерение емкости кабеля производится с помощью мостов переменного тока на частоте порядка 1КГц. Данный вид измерений позволяет определить значение емкости кабеля при обрывах и сопротивлениях изоляции в месте повреждения не менее 300Ом. При меньших сопротивлениях возрастает погрешность измерения емкости, следовательно, уменьшается точность определения места повреждения.

Условие квазистационарности. При измерении длины кабеля емкостным методом, измерение его электрической емкости производится на низких частотах. Согласно условию квазистационарности, распределенную емкость и проводимость утечки кабеля можно описать, применяя математическую модель реального конденсатора. Таким образом, рассматривая линию как модель реального конденсатора, можно применить существующие методы измерения параметров конденсатора (методы измерения параметров конденсаторов рассмотрены далее), относительно которых можно определить длину (место повреждения) исследуемой линии.

Эквивалентная схема реального конденсатора. Согласно условию квазистационарности, распределенную емкость и проводимость утечки кабеля можно описать, применяя векторную диаграмму реального конденсатора.

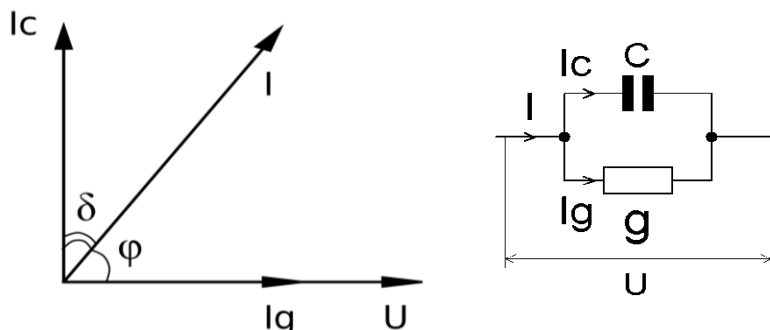


Рис.1. Эквивалентная схема реального конденсатора и его векторная диаграмма.

Точность методов измерения емкости. В ходе проведенного литературного обзора по методам измерения параметров конденсаторов были определены точность методов измерения (Табл.1) и их погрешность. Погрешность измерения методом вольтметра-амперметра зависит от класса точности применяемых измерительных приборов. Значение погрешности достигает $\sim 7\%$ и возрастает с увеличением частоты. Данный метод целесообразно применять на низких частотах для измерения емкости и индуктивности и на постоянном токе для измерения сопротивления. Таким образом, фазовый сдвиг, следовательно, тангенс угла потерь определить с помощью такого метода невозможно.

Погрешность измерений методом замещения зависит от чувствительности индикатора и погрешности отсчёта ёмкости C_0 ; она может быть получена равной примерно 1% и менее.

Мостовой метод позволяет измерять значения емкости и тангенса угла потерь с высокой точностью (погрешность измерения δ составляет $1-2\%$) в широком диапазоне измеряемых активных и реактивных составляющих величин. Источниками погрешностей мостовых измерений являются неточность балансировки моста, погрешность значений образцовых

сопротивлений, нестабильность частоты генератора, питающего мост, а также паразитные емкостные связи между плечами моста.

Погрешность измерения параметров фазового метода определяется как сумма инструментальной погрешности осциллографа и субъективной погрешности, обусловленной определением начала и конца развертки, а также определением смещения синусоидального сигнала под разным углом зрения. Минимальное измеряемое значение фазового сдвига определяется длиной измерительной сетки экрана осциллографа. Фазовый метод не способен определить значение тангенса угла потерь измеряемого конденсатора, т.к. модель реального конденсатора является неделимой на идеальный резистор и идеальный конденсатор, между которыми могло бы быть произведено измерение фазового сдвига.

Погрешность измерения параметров резонансным методом возникает вследствие неточности настройки в резонанс, неточности отсчёта по шкалам значений частоты, нестабильности частоты генератора, погрешности образцовых катушки или конденсатора и наличия неучтенной собственной емкости измеряемой катушки индуктивности. Значение величины погрешности измерения емкости и индуктивности составляет 2-5% [22],[23].

Табл.1.

Метод	Диапазон измерения емкости С	Диапазон измерения $tg\delta$
Вольтметра-амперметра	10nF-1mF	_____
Замещения	10nF-1mF	_____
Мостовой (Е7-8)	0,01pF-100μF	$10^{-4} - 1$
Фазовый	1nF-1μF	_____
Резонансный (Е7-5А)	1pF-5000pF	10^{-4}

Обзор современных измерителей. В рамках данной работы был проведен обзор современных измерителей иммитанса брендовых фирм Agilent и Rohde&Schwarz [15,16], а также российского измерителя иммитанса E7-25 [17]. Основные параметры измерителей представлены в таблицах Табл.2 - 4.

Табл.2.

Параметр измерения	Модель	Agilent 4268A	
	F		120 Hz
C		1pF-9.(9)mF	10^{-4} nF-999.(9) μ F
tgδ (D)		10^{-4} -9.(9)	10^{-4} -9.(9)

Табл.3.

Параметр измерения	Модель	Agilent 4288A	
	F		1 KHz
C		0.001pF-20 μ F	0.00001-1.5nF
tgδ (D)		0.00001-9.(9)	0.00001-9.(9)

Табл.4.

Параметр измерения	Модель E7-25
F	25Hz - 1 MHz
C	$10^{-15}\text{F} - 1\text{F}$
tgδ (D)	$10^{-4} - 10^4$

Метод измерения емкости автогенераторным измерительным преобразователем. В ряде публикаций, посвященных измерению составляющих комплексного сопротивления высокопотерного емкостного датчика [13], а также диффузионной емкости полупроводниковых приборов [7] применяют автогенераторные измерительные преобразователи (АИП). Данное устройство рис.2 позволяет производить отдельные и независимые преобразования измеренных активной и реактивной составляющих исследуемой цепи (высокопотерного емкостного датчика и емкости р-п-переходов в прямом направлении) в амплитуду и частоту гармонических автоколебаний. Основными преимуществами такого метода измерений являются:

- Отсутствие внешнего источника входного сигнала, посредством которого можно судить о характере комплексного сопротивления исследуемой цепи; исследуемая цепь является составной частью АИП.

- Раздельность измерения составляющих комплексного сопротивления исследуемой цепи (в работе [3] погрешность раздельного измерения составляет не более 2%).

- Высокая разрешающая способность измерения составляющих комплексного сопротивления исследуемой цепи, в частности, высокая чувствительность при измерении реактивной составляющей. В работе [3] описано устройство АИП, чувствительность к изменению емкости которого

составляет величину порядка $0,001\text{пФ}$ в диапазоне значений активной проводимости от 10^{-6} до $2 \cdot 10^{-2}\text{См}$.

Благодаря высокой чувствительности АИП к изменению емкости данный метод измерения можно использовать для измерения длины кабеля с высокой точностью по его электрической емкости, а также обнаружения дефектов, таких как, обрыв кабеля.

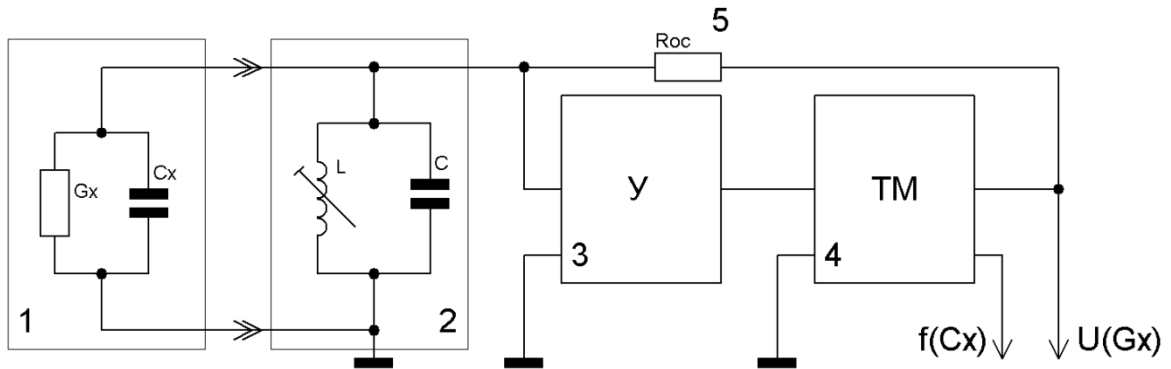


Рис.2. блок-схема автогенераторного измерительного преобразователя (АИП)

Блок-схема АИП-а состоит из нескольких основных частей:

1. Измеряемый объект, обладающий емкостной и активной проводимостью
2. Колебательная система
3. Широкополосный усилитель
4. Инерционное звено (Термистор)
5. Цепь обратной связи R_{oc}

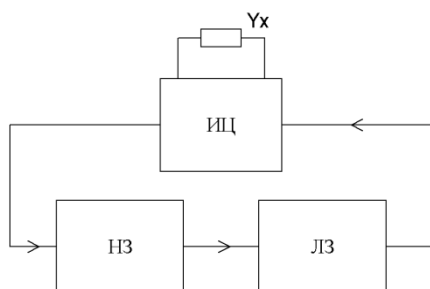


Рис.3. Обобщенная схема АИП.

Обобщенную схему автогенераторного преобразователя параметров Z_x или Y_x в измерение частоты и амплитуды автоколебаний можно представить схемой, изображенной на рис.3. здесь усилитель УС представлен некоторым обобщенным нелинейным звеном НЗ и линейным звеном

ЛЗ. Вход и выход усилителя соединены через измерительную цепь ИЦ, в которую включена измеряемая комплексная проводимость Y_x . В работе [26] показано, что если ЛЗ в такой системе обладает селективными свойствами или постоянная времени НЗ удовлетворяет соотношению $\omega\tau \gg 1$, то в ней могут существовать гармонические колебания вида:

$$U(t) = U_{m0} \sin(\omega_0 t). \quad (1)$$

В этом случае характеристическое уравнение системы может быть представлено гармонически линеаризованным уравнением вида:

$$W(U, \omega) = 1 - \dot{K}_{ЛЗ}(\omega)\dot{K}_{ИЦ}(\omega)\dot{K}_{НЗ}(U) = 0, \quad (2)$$

где $\dot{K}_{ЛЗ}(\omega)$, $\dot{K}_{ИЦ}(\omega)$, $\dot{K}_{НЗ}(U)$ – коэффициенты передачи линейного звена, измерительной цепи и нелинейного звена, соответственно.

Практическая часть

Способы определения емкости кабеля. Измерение длины кабеля по его емкости посредством АИП происходит в режиме, когда кабель отключен от источника и приемника э/м энергии. Подключение линии без дефекта приведет к изменению частоты автоколебаний f_0 . Определение обрыва гарантируется тем, что данный эффект подтверждается отсутствием изменения напряжения на термисторном мосту $\Delta U(g_x) = 0$.

Измеренное значение емкости кабеля можно определить с помощью формулы Томпсона. Зная емкость и индуктивность измерительного колебательного контура АИП, а также частоту автоколебаний в случае подключения измеряемой линии к АИП, можно найти значение емкости кабеля (3).

$$C_{\text{каб}} + C_0 = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} \quad (3)$$

Существует еще один способ измерения емкости кабеля $C_{\text{каб}}$ относительно опорной частоты f_0 автоколебаний АИП. Данный способ обладает большей точностью по сравнению с предыдущим.

Определение измеряемой величины $C_{\text{каб}}$ производится по уходу частоты автоколебаний АИП. Зная значение частоты автоколебаний АИП до и после подключения исследуемого двухполюсника, а также емкость колебательного контура C_0 , можно определить значение измеряемой емкости кабеля $C_{\text{каб}}$ (4).

$$C_x = C_0 \left[\left(\frac{f_0}{f_1} \right)^2 - 1 \right]. \quad (4)$$

Согласно [1], представляя емкость кабеля $C_{\text{каб}}$ как емкость цилиндрического конденсатора, можно определить длину кабеля из формулы (5), где k – емкость кабеля на метр длины.

$$C_{\text{каб}} = kl, \quad (5)$$

$$k = \frac{2\pi\epsilon_a}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (6)$$

Измерение емкости конденсаторов. Для проведения эксперимента с макетом АИП-а были использованы конденсаторы, параметры которых измерены мостовым измерителем Е7-8. Измерение заключалось в регистрации значений частот до подключения емкости к измерительной цепи и после её подключения. Определение измеренной емкости производилось двумя выше описанными способами. На рис.4 представлена блок-схема АИП, в измерительной цепи которого параллельно колебательному контуру подключен отрезок коаксиального кабеля ll измерительной камерой КИ-2.

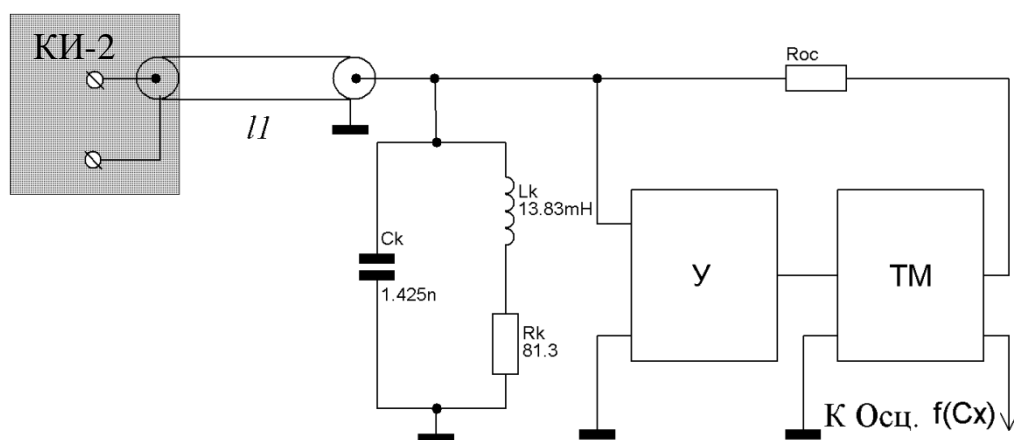


Рис.4. блок-схема автогенераторного измерительного преобразователя (АИП).

На рис.5 представлен график зависимости частоты автоколебаний от емкости с учетом параметров колебательного контура. На данном графике отмечены значения частот автоколебаний АИП в зависимости от значений измеряемых емкостей. Первый способ измерения имеет малую точность в диапазоне емкостей порядка сотен пикофард. С увеличением значения измеряемой емкости точность способа измерения увеличивается. Например, при значениях измеряемой емкости порядка десятков нанофард значение погрешности измерения составляет 2 – 6 %. С уменьшением значения измеряемой емкости погрешность измерения данного способа резко возрастает.

Второй способ измерения емкости относительно опорной частоты автоколебаний АИП обладает малой погрешностью измерения. Зная общую

емкость измерительной цепи, можно с большой точностью проводить измерения емкости конденсаторов. Значение погрешности измерения данным способом на 2 порядка меньше во всем диапазоне измерения по сравнению с предыдущим способом. Значения измеренных емкостей посредством АИП и погрешности измерения представлены в Табл. 1.

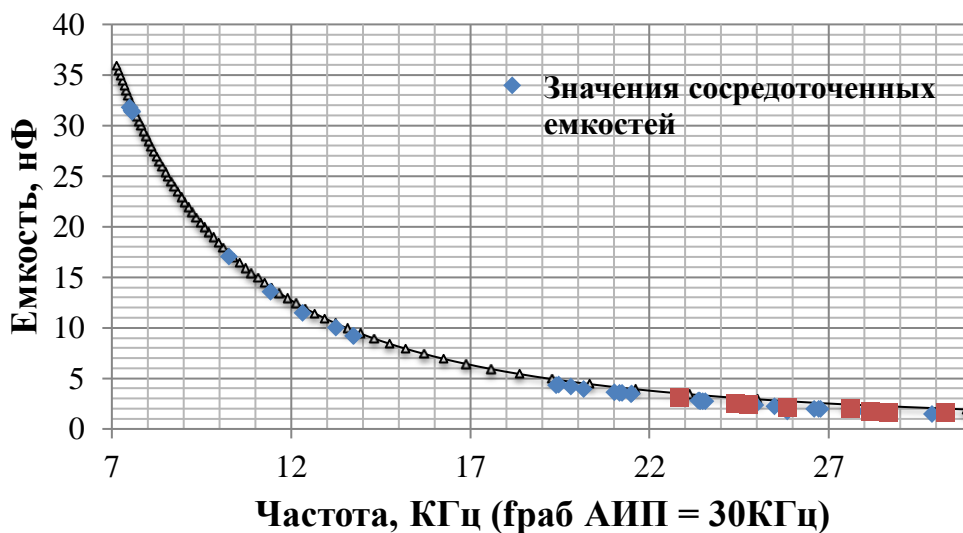


Рис.5. График зависимости частоты автоколебаний от емкости с учетом параметров колебательного контура

Табл. 1

C(E7-8), F	F0, KHz	Fp, KHz	C(АИП), F	δ, %
5,165E-11	30,277	29,894	5,25E-11	1,60
2,326E-10	30,273	28,654	2,36E-10	1,66
3,307E-10	30,264	28,048	3,34E-10	1,08
5,63E-10	30,281	26,772	5,68E-10	0,96
5,69E-10	30,279	26,726	5,77E-10	1,41
5,922E-10	30,262	26,594	6,00E-10	1,33
8,212E-10	30,271	25,5	8,33E-10	1,40
9,521E-10	30,247	24,957	9,54E-10	0,21
1,332E-09	30,182	23,57	1,30E-09	2,26
1,347E-09	30,187	23,493	1,32E-09	1,64
1,364E-09	30,245	23,427	1,36E-09	0,52
1,378E-09	30,199	23,367	1,36E-09	1,02
1,402E-09	30,246	23,401	1,36E-09	2,67
2,03E-09	30,203	21,499	1,98E-09	2,40
2,072E-09	30,239	21,504	1,99E-09	4,00
2,142E-09	30,192	21,239	2,08E-09	3,02
2,184E-09	30,224	21,166	2,11E-09	3,18

C(E7-8), F	F0, KHz	Fp, KHz	C(АИП), F	δ, %
2,242E-09	30,222	21,027	2,17E-09	3,26
2,542E-09	30,185	20,173	2,52E-09	0,82
2,765E-09	30,196	19,811	2,69E-09	2,61
2,926E-09	30,2	19,397	2,90E-09	0,96
2,96E-09	30,23	19,481	2,87E-09	3,20
7,766E-09	30,205	13,749	7,79E-09	0,26
7,803E-09	30,215	13,745	7,80E-09	0,05
8,65E-09	30,179	13,256	8,51E-09	1,59
1,005E-08	30,261	12,331	1,02E-08	1,70
1,217E-08	30,175	11,44	1,21E-08	0,38
1,563E-08	30,261	10,273	1,56E-08	0,05
2,997E-08	30,164	7,579	3,02E-08	0,77
3,011E-08	30,156	7,555	3,04E-08	0,92
3,04E-08	30,151	7,512	3,07E-08	1,15

Измерение емкости отрезков коаксиальных кабелей. Во втором эксперименте проведено измерение емкости образцов коаксиального кабеля различных моделей и длин. Измерения проводились мостовым измерителем E7-8 и АИП-ом. Измерения мостового измерителя приняты за эталонные значения измеренной емкости. Полученные значения емкости отрезков кабеля относительно значений частот автоколебаний АИП до и после подключения кабеля к измерителю, измеренные емкости отрезков кабеля с помощью мостового измерителя E7-8, а также погрешность измерения представлены в таблице 2.

Табл.2.

Отрезок кабеля	C_{E7-8} , пФ	F_0 , КГц	F_p , КГц	C_x , pF	δ , %
K1	606,7	31,925	27,625	603,3027	0,559
K2	710,3	30,035	25,863	709,4915	0,1138
K3	1722	30,033	22,852	1479,904	14,059
K4	1017	30,019	24,77	953,855	6,209
K5	275,5	30,028	28,185	274,836	0,241
½ K6	204,2	31,91	30,26	201,426	1,358
½ K'6	203,7	30,087	28,687	203,4733	0,1113
K7	1075	30,102	24,424	1056,16	1,7525

Вывод. В ходе проведенных экспериментов по измерению емкости сосредоточенных конденсаторов и отрезков коаксиального кабеля было выяснено, что метод АИП пригоден для измерения длины коаксиальных волноведущих систем. Средняя погрешность измерения емкостей отрезков кабеля составляет около 3%.

Заключение

В ходе многочисленных экспериментов с макетом АИП по измерению емкости сосредоточенных конденсаторов, а также емкостей отрезков коаксиального кабеля, выше перечисленные объекты были измерены с высокой точностью, что и подтверждает условие квазистационарности, а также возможность применения данного метода для измерения коаксиальных волноведущих систем. Метод АИП рекомендуется для создания аппаратных средств – измерителей длины коаксиальных волноведущих систем.

Дальнейшие перспективы возможности применения метода АИП не ограничиваются измерением емкости коаксиальных линий или сосредоточенных емкостей конденсаторов: они находят широкое применение в таких отраслях развития как медицина (биоимпедансное исследование, электроимпедансная томография) [24], [18], [19], [20], строительство [25], нефтеперерабатывающая промышленность [27], [28] и геология [21].

Список используемой литературы

1. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях./ М.: Энергоиздат, 1982. – 312с., ил..
2. Двинских, В.А. Раздельные измерения составляющих комплексного сопротивления полупроводниковых объектов с большими потерями /Двинских В.А., Парусов В.П., Сергеев А.С.// Метрология – 1978 - №5.
3. Ерошенко, Г.П. Автогенераторный преобразователь параметров емкостного датчика с высокими потерями / Ерошенко Г.П., Парусов В.П., Шаруев В.Н. //Приборы и техника эксперимента – 2001- №1с 65-67.
4. Парусов, В.П. Расширение диапазона преобразования активной проводимости емкостных датчиков в электрический сигнал с помощью автогенераторов с термисторным мостом / Парусов В.П., Шаруев Н.К., Шаруев В.Н.// ПТЭ – 2002 - №3 с54-56.
5. Парусов, В.П. Автогенераторные преобразователи емкости с термисторным мостом в измерительной цепи / Парусов В.П., Шаруев Н.К., Шаруев В.Н. // ПТЭ 2003 №5 с79-81.
6. Парусов, В.П. Автогенераторные преобразователи емкости с коррекцией в цепи обратной связи / Парусов В.П., Шаруев Н.К., Шаруев В.Н. // ПТЭ - 2003 - №5 с82-84.
7. Парусов, В.П. Цифровой измеритель емкостей р-п переходов / Парусов В.П., Сергеев А.С. // ПТЭ
8. Парусов В.П., Сергеев А.С. Увеличение точности и расширение диапазона измерений малых емкостей и индуктивностей гетеродинным методом. Парусов В.П., Сергеев А.С. // ПТЭ 1979, №1 с35-39.
9. Парусов, В.П. Особенности измерения емкости датчика с большими активными потерями./ Парусов В.П., Шаруев Н.К., Шаруев В.Н., Улыбин, Н.А. // Измерительная техника 2002, №8 с60-62.
10. Парусов, В.П. Расширение допустимого диапазона активных потерь датчика при преобразовании его емкости в частоту./ Парусов В.П., Шаруев Н.К., Шаруев В.Н., Юров П.Н. // ПТЭ 2002, №1 с70-72.

11. Двинских, В.А. Измерительный схемы с самовозбуждением. М.-Л., Госэнергоиздат, 1962г., 48с.
12. Двинских, В.А. Основы теории автогенераторных измерительных схем. Изд-во Саратов. ун-та, 1975г. 127с.
13. Ананьев, И. П. Автореферат диссертации. Автогенераторные измерительные преобразователи двухкомпонентной диэлькометрии. Санкт-Петербург 2009.
14. Евстафьев, Д. П. Диссертация. Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве. Саратов 2014.
15. Agilent Technologies Test & Measurement Catalog 2008/09.
16. Rohde & Schwarz HM8118 LCR-Bridge Technical Data 2017.
17. Руководство по эксплуатации измерителя иммитанса E7-25.
18. Корженевский, А.В. "Электроимпедансная томография: исследования, медицинские приложения, коммерциализация", Альманах клинической медицины, т. XII, II Троицкая конференция "Медицинская физика и инновации в медицине", Троицк, с. 58, 2006.
19. Белик, Д.В. Импедансные медицинские системы для хирургии. Биотехносфера № 5-6 (11-12) с78-87. 2010г.
20. Коломиец, В.Я. Электроимпедансная томография – новый метод респираторного мониторинга. Поликлиника 1/2013.
21. Жданов, М.С. Электроразведка: учебник для вузов. – М.:Недра, 1986 – 316 стр.
22. Кушнир, Ф. В. Измерения в технике связи. / Кушнир Ф. В. и др. Измерения в технике связи. 2-е изд. М., 1976. 432 с., с ил.
23. Кушнир, Ф. В. Электрорадиоизмерения. / Кушнир Ф. В. Электрорадиоизмерения – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 320 с., с ил.
24. Николаев, Д.В. Биоимпедансный анализ состава тела человека. /Д.В. Николаев, А.В. Смирнов, И.Г. Бобринская, С.Г. Руднев. – М.: Наука, 2009. – 392с.

25. Возможности и перспективы высокочастотного диэлькометрического анализа строительных материалов.
http://www.nauka.sibstrin.ru/files/ntk/IX/tez_/7.pdf (01.12.18г.)

26. Матханов, П.Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи: Учеб. пособие для студентов электротехники. спец. ВУЗов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986г. – 352стр.

27. Васильев, В.В. Автоматизированная универсальная высокочастотная диэлькометрическая установка. Ангарск 2005г.

28. Поляков, С.А. Средство диэлькометрического контроля бензина (дисс.).