

тельным коэффициентом трансформации понимается величина

$$K_{mp}^* = \frac{K_{mp}}{K_{mp} \text{ (при } C_{из} = C_{из.ном})}},$$

$$\text{где } C_{из.ном} = \frac{C_{из.мах} + C_{из.мин}}{2}.$$

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод, что описанный способ снижения погрешности измерения амплитуды импульсов испытательного напряжения эффективен.

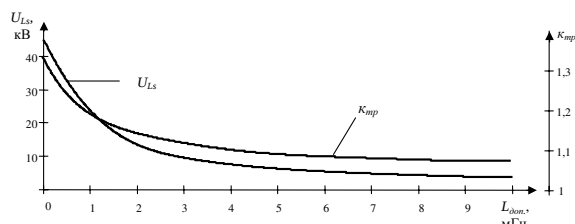


Рис. 5. Зависимости падения напряжения на индуктивности рассеяния и относительного коэффициента трансформации от индуктивности дополнительного дросселя

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. — М.: Энергия, 1973. — 232 с.
2. Холодный С.Д. Методы испытаний и диагностики кабелей и проводов. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 200 с.
3. Техническое описание и инструкция по эксплуатации прибора «Корона ЗАСИ-30/30». — Томск: ООО «Эрмис+», 2002. — 55 с.
4. Редько Л.А. Проблемы измерения амплитуды выходного напряжения импульсных высоковольтных испытателей // Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения: Докл. Росс. научно-техн. конф. — Томск, 2004. — С. 55–57.
5. <http://www.ermis.tomsk.ru>

Вывод формулы $L_{дон} = f(\delta, C1, L_S, L_{\mu}, C_{из}, C_{м.в.}, C_{з.у.}, R_{из})$ является задачей сложной, которая может быть решена с применением современных математических пакетов только в численном виде. Попытки получить величину в общем виде приводят к громоздким выражениям уже на начальном этапе решения задачи, поэтому такой подход практически непригоден для инженерных расчетов. По этой причине эффективным будет способ выбора значения индуктивности $L_{дон}$ путем моделирования работы выходного каскада высоковольтного испытателя изоляции в пакетах схемотехнического моделирования (например, ORCAD). При моделировании рекомендуется использовать схему, указанную на рис. 3. Начальными данными при моделировании будут являться $U_1, C1, L_{\mu}, L_S, C'_{м.в.}, C'_{з.у.}, C'_{из}, R'_{из}, U_{исп}, \delta$, а выходными — $L_{дон}$ и ток $I_{L_{дон.мах}}$. Величина тока $I_{L_{дон.мах}}$ необходима для конструктивного расчета дросселя $L_{дон}$.

Описанный способ косвенного измерения испытательного напряжения используется в импульсных высоковольтных испытателях изоляции, выпускаемых ООО «Эрмис+», г. Томск.

6. Верижников В.Г., Шмейлин З.И. Импульсный аппарат для контроля герметичности защитного шланга // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. — 1977. — Вып. 9(151). — С. 15–16.
7. Техническое описание и инструкция по эксплуатации прибора «Корона И». — Томск: ООО «Эрмис+», 2001. — 48 с.
8. Турикова Т.П., Черневский И.Н. Методы испытаний кабелей, проводов и шнуров напряжением // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. — 1979. — Вып. 11(177). — С. 7–8.
9. Свид. на ПМ 45834 РФ. МПК⁷ G01R 31/14. Устройство для испытания полимерной изоляции кабеля / В.В. Редько, Л.А. Редько. Заявлено 27.12.2004; Оpubл. 27.05.2005, Бюл. № 15. — 3 с.: ил.

УДК 621.317.53.08

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДВУХПОЛЮСНИКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА

В.И. Туев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: tvi@tv2.tomsk.ru

Предложен метод измерения полных сопротивлений двухполюсников, включающий измерение модуля комплексного сопротивления (погрешность $\pm 7\%$) и его действительной части (погрешность $\pm 3\%$) с применением импульсного сигнала. Предложена структурная схема устройства, даны рекомендации по выбору значения частоты генератора сигналов и параметров измерительной цепи.

1. Введение и постановка задачи

Необходимость измерения комплексных сопротивлений двухполюсных электрических цепей сопутствует решению задач проектирования и эксплуатации технологических датчиков [1, 2], элементов устройств систем связи и управления [3], в

радиотехнических измерениях [4] и т.д. Измерения производятся на конечном ряде частот, включая ее нулевое значение, т.е. на постоянном токе. Измеряемое сопротивление Z_x на конкретной частоте представляется в виде эквивалентной цепи, содержащей активную часть R и реактивную составляющую

щую либо емкостного характера C , включенную параллельно, либо индуктивного характера L , включенную последовательно, как показано на рис. 1.

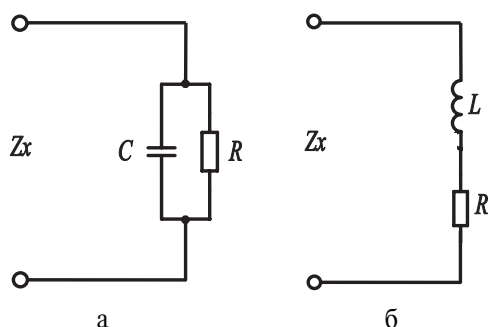


Рис. 1. Эквивалентные схемы замещения сопротивления двухполюсника: R – активная составляющая, C и L – емкостная и индуктивная составляющие полного сопротивления

Полное сопротивление измеряемой цепи, содержащей емкость, имеет вид:

$$Z_C = \frac{R}{1 + j\omega\tau}, \tau = RC, \quad (1)$$

содержащей индуктивность:

$$Z_L = R(1 + j\omega\tau), \tau = \frac{L}{R}, \quad (2)$$

где τ – постоянная времени измеряемой цепи.

Обычно для определения полного входного сопротивления радиовещательных линий [5], имеющих ёмкостную реактивную составляющую, используют метод, заключающийся в подключении к генератору синусоидального напряжения частотой 400 Гц с регулируемой амплитудой колебаний последовательно соединённых входного сопротивления измеряемой линии и эталонного резистора, регулировке выходного напряжения названного генератора до получения на эталонном резисторе заранее известного напряжения, измерении на входе радиовещательной линии переменного напряжения, определении модуля комплексного сопротивления линии, последующем измерении входного сопротивления радиовещательной линии постоянному току и расчете емкости входной цепи по формулам, вытекающим из выражения (1). Погрешность измерения не превышает $\pm 10\%$. Недостатком способа является его непригодность для измерения сопротивлений цепей, содержащих последовательно включенные конденсаторы, сопротивление постоянному току которых велико.

Компенсационный способ определения полного входного сопротивления электрических цепей заключается в подключении к генератору синусоидального тока сопротивления измеряемой цепи и магазина реактивностей, компенсации реактивности измеряемой цепи, измерении напряжения на измеряемом сопротивлении и расчёте действительного значения сопротивления цепи R по известному значению тока вышеназванного генератора. Реактивная составляющая измеряемого сопротивления отсчитывается по лимбам магазина реактивно-

стей. Погрешность измерения модуля комплексного сопротивления двухполюсников составляет $\pm 10\%$, реактивной составляющей – $\pm 15\%$. Недостаток компенсационного способа заключается в необходимости использования для его осуществления громоздкого магазина реактивностей, сложность и большая продолжительность определения полного сопротивления измеряемой цепи.

В данной работе предлагается метод измерения полных сопротивлений двухполюсников с произвольной схемной реализацией без применения магазина реактивностей и ручного выбора его параметров.

2. Анализ предлагаемого технического решения

Функциональная схема устройства, реализующего предлагаемый метод измерения, приведена на рис. 2. Устройство содержит генератор импульсных сигналов Γ с двумя синхронными выходами. На первом из выходов присутствует импульсный сигнал частотой f_Γ со скважностью $q_1=2$, а на втором – импульсный сигнал с большей скважностью. Для примера рассмотрим импульсный сигнал со скважностью $q_2=4$.

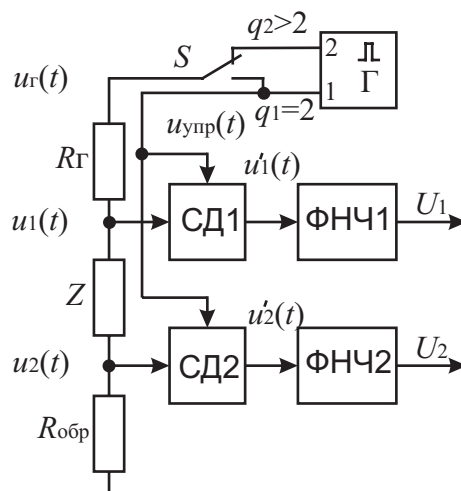


Рис. 2. Функциональная схема устройства измерения полного сопротивления двухполюсников: R_Γ – гасящий резистор, $R_{обр}$ – образцовый резистор, СД1 и СД2 – синхронные детекторы, ФНЧ1 и ФНЧ2 – фильтры нижних частот

Цепь из последовательно соединенных гасящего резистора R_Γ , измеряемого сопротивления двухполюсника Z и образцового резистора $R_{обр}$ через переключатель S подключается к одному из выходов генератора Γ . Сигналы $u_1(t)$ и $u_2(t)$ поданы на входы двух ключевых синхронных детекторов СД1 и СД2, управляющие входы которых соединены со вторым выходом генератора Γ . Расчетное значение измеряемого сопротивления определяется по формуле

$$R_{расч} = \frac{U_1 - U_2}{U_2} R_{обр}, \quad (3)$$

где U_1 и U_2 – выходное напряжение соответственно первого и второго фильтров нижних частот.

В соответствии с операторным методом анализа электрических цепей [6] форма сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ при нулевых начальных условиях определяется в соответствии с выражением

$$u_{1,2}(t) = L^{-1}[S(p) \cdot W_{1,2}(p)], \quad (4)$$

где L – обратное преобразование Лапласа, $W_{1,2}(p)$ – операторные выражения передаточных функций, $S(p)$ – изображение Лапласа сигнала на выходе ключа S на рис. 2.

Передаточные функций $W_{1,2}(p)$ для емкостного и индуктивного характера реактивности измеряемого двухполюсника без учета влияния входного сопротивления синхронных детекторов могут быть представлены в общем виде:

$$W_{1,2}(p) = K_{1,2} \frac{(1 + pT_1)}{(1 + pT_2)}, \quad (5)$$

где K – значение передаточной функции на нулевой частоте, T_1 и T_2 – эквивалентные постоянные времени.

Формулы для расчета $K_{1,2}$, T_1 и T_2 схем замещения измеряемого двухполюсника, изображенных на рис. 1, приведены в таблице.

Таблица. Расчетные соотношения для коэффициентов K , T_1 и T_2 для емкостного и индуктивного характера реактивности измеряемого сопротивления

Передаточная функция	Характер нагрузки	$K_{1,2}$	T_1	T_2
$W_1(p)$	Емкостной	$K_1 = \frac{R + R_{обр}}{R + R_{обр} + R_f}$	$\frac{\tau R_{обр}}{R + R_{обр}}$	$\frac{\tau(R_f + R_{обр})}{R + R_{обр} + R_f}$
	Индуктивный		$\frac{\tau}{1 + \frac{R_{обр}}{R}}$	$\frac{\tau}{1 + \frac{R_{обр} + R_f}{R}}$
$W_2(p)$	Емкостной	$K_2 = \frac{R_{обр}}{R + R_{обр} + R_f}$	τ	$\frac{\tau(R_f + R_{обр})}{R + R_{обр} + R_f}$
	Индуктивный		0	$\frac{\tau}{1 + \frac{R_{обр} + R_f}{R}}$

Подставив (5) в (4) и воспользовавшись таблицами преобразования Лапласа [6] для входного импульсного воздействия в виде суммы двух разнополярных единичных перепадов напряжения, получим оригинал:

$$u_{1,2}(t) = K_{1,2} \left[1 - \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) e^{-\frac{t}{T_2}} \right] \text{ при } 0 < t < T/q, \quad (6)$$

$$u_{1,2}(t) = K_{1,2} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \left[e^{-\frac{t - T/q}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right] \text{ при } t > T/q, \quad (7)$$

где T – период следования импульсов.

Сигналы на выходах ключевых синхронных детекторов СД1 и СД2 определяются по формулам [7]:

$$u'_{1,2}(t) = 0, \text{ если } u_{\text{упр}}(t) = 0, \quad (8)$$

$$u'_{1,2}(t) = u_{1,2}(t), \text{ если } u_{\text{упр}}(t) = 1. \quad (9)$$

На рис. 3 форма сигнала $u'_2(t)$ на выходе синхронного детектора СД2 для случая емкостного характера измеряемого сопротивления, полученная в соответствии с (6–9), показана утолщенной линией.

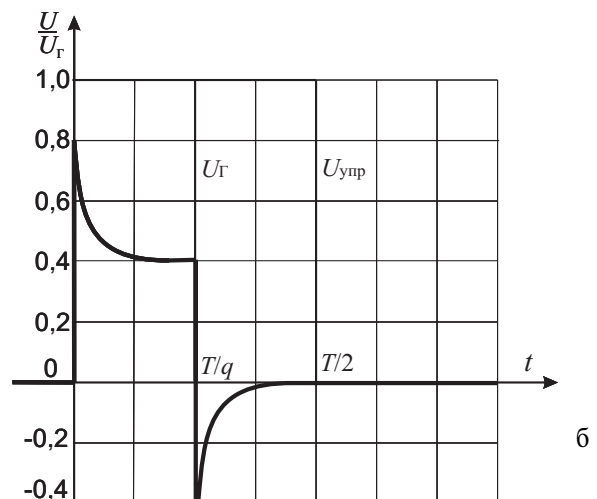
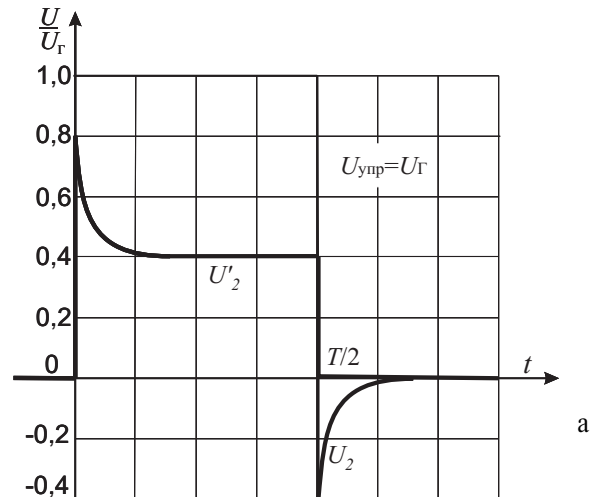


Рис. 3. Форма сигнала на входе и выходе синхронного детектора СД2 при скважности q : а) 2 и б) 4

Фильтры нижних частот ФНЧ1 и ФНЧ2 выделяют постоянную составляющую сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$. Для расчета постоянной составляющей сигналы на выходах СД1 и СД2 представляются рядами Фурье [6]:

$$u'_{1,2}(t) = U_{1,2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\omega_f t + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin k\omega_f t, \quad (10)$$

$$U_{1,2} = \frac{1}{T} \int_0^T u'_{1,2}(t) dt, \quad T = \frac{1}{f_f},$$

где a_k и b_k – коэффициенты разложения в ряд Фурье.

Компоненты разложения на нулевой частоте $U_{1,2}$ далее используются для расчета измеряемого сопротивления в соответствии с (3).

3. Результат измерения при скважности импульсов $q=2$

При скважности импульсов $q=2$ сигнала генератора (в нижнем положении переключателя S на рис. 2) рассчитанное значение $R_{\text{расч}}$ определяет модуль комплексного сопротивления измеряемого двухполюсника на частоте f_r . Зависимость погрешности измерения модуля комплексного сопротивления для емкостного и индуктивного характера полного сопротивления измеряемого двухполюсника приведена на рис. 4.

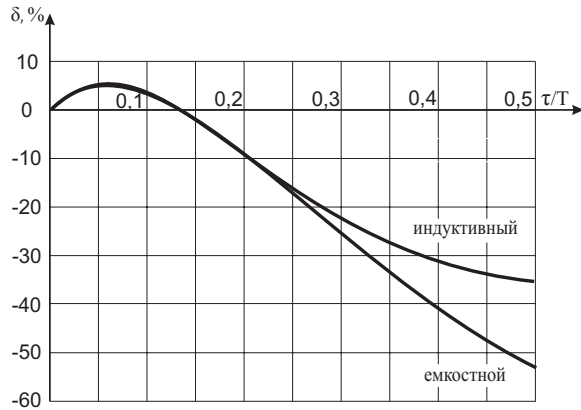


Рис. 4. Зависимость погрешности измерения модуля комплексного сопротивления двухполюсников в зависимости от нормированной постоянной времени для емкостного и индуктивного характера реактивной составляющей измеряемого сопротивления

Из рис. 4 следует, что погрешность измерения модуля комплексного сопротивления двухполюсников не превышает $\pm 7\%$ при частоте следования импульсов генератора

$$f_r < \frac{0,17}{\tau}.$$

3. Результат измерения при скважности импульсов $q>2$

При скважности импульсов $q>2$ сигнала генератора (в верхнем положении переключателя S на рис. 2) рассчитанное значение $R_{\text{расч}}$ определяет активную составляющую полного сопротивления измеряемого двухполюсника.

Доказательство.

При скважности сигнала генератора $q>2$ в формировании отклика на выходе синхронного детектора участвует весь переходный процесс, как показано утолщенной линией на рис. 3, б.

При определении компонента разложения в ряд Фурье на нулевой частоте область интегрирования в (8) может быть представлена двумя интервалами

$$U_{1,2} = \frac{1}{T} \int_0^T u'_{1,2}(t) dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{\frac{T}{q}} u_{1,2}(t) dt + \int_{\frac{T}{q}}^T u_{1,2}(t) dt \right). \quad (11)$$

Полагая $q=4$ и используя аналитическое описание сигнала $u(t)$ в виде (6, 7), выражение (11) может быть представлено в виде

$$U_{1,2} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{\frac{T}{q}} K_{1,2} (1 - \alpha e^{-\frac{t}{T_2}}) dt + \int_{\frac{T}{q}}^{\frac{T}{2}} K_{1,2} \alpha e^{-\frac{t}{T_2}} dt \right), \quad (12)$$

где $\alpha = 1 - \frac{T_1}{T_2}$.

Экспоненциальная составляющая переходного процесса в (12) имеет монотонно затухающий характер. При условии

$$e^{-\frac{T}{qT_2}} = 0 \quad (13)$$

справедливо равенство

$$\int_0^{\frac{T}{q}} e^{-\frac{t}{T_2}} dt = \int_{\frac{T}{q}}^{\frac{T}{2}} e^{-\frac{t}{T_2}} dt. \quad (14)$$

Раскрывая определенные интегралы в (12) с учетом (13), получим

$$U_{1,2} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{\frac{T}{q}} K_{1,2} (1 - \alpha e^{-\frac{t}{T_2}}) dt + \int_{\frac{T}{q}}^{\frac{T}{2}} K_{1,2} \alpha e^{-\frac{t}{T_2}} dt \right) = \frac{K}{q}. \quad (15)$$

Проведя аналогичный расчет по формулам (4–15) для активного двухполюсника ($C=0$, $L=0$ на рис. 1), можно показать, что результат получится точно такой же. То есть при измерении сопротивлений двухполюсников с применением импульсного сигнала со скважностью $q>2$ при выполнении равенства (13) результат расчета по формуле (3) определяет активную составляющую R комплексного сопротивления измеряемого двухполюсника.

Не выполнение условия (13) приводит к дополнительной погрешности измерения активной составляющей комплексного сопротивления измеряемого двухполюсника, рис. 5.

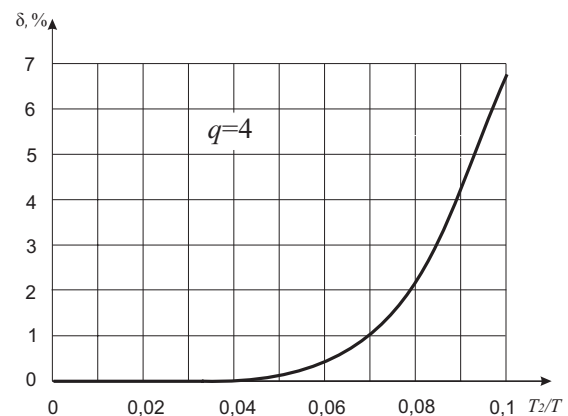


Рис. 5. Зависимость погрешности измерения активной составляющей комплексного сопротивления двухполюсников от нормированного значения постоянной времени T_2

Постоянная времени T_2 всегда меньше постоянной времени измеряемой цепи τ (см. таблицу), поэтому справедливо следующее утверждение — дополнительная погрешность измерения активной составляющей

вляющей комплексного сопротивления двухполюсников не превышает 1 % при выполнении условия

$$f_r < \frac{0,07}{\tau}.$$

4. Экспериментальное моделирование

Для экспериментальной проверки предложенного метода измерения полных сопротивлений двухполюсников с применением импульсного сигнала разработано устройство, функциональная схема которого приведена на рис. 2. Генератор выполнен в виде каскадно соединенных цифрового синтезатора частоты, счетчика импульсов по модулю 4, логического элемента ИЛИ-НЕ и инвертора. Синтезатор частоты вырабатывает сигнал в виде меандра на частоте $4f_r$. С каждого из четырех выходов счетчика импульсов снимается импульсный сигнал с частотой f_r , скважностью 4 и сдвигом по фазе на 90° . Сигналы с первых двух выходов счетчика суммируются в логическом элементе ИЛИ-НЕ и через инвертор подаются на первый вход переключателя S , образуя импульсный сигнал с $q_1=2$. Сигнал с первого выхода счетчика со скважностью $q_2=4$ подается на второй вход переключателя S . Синхронные детекторы выполнены на микросхеме КР590КН4. Фильтры нижних частот ФНЧ1 и ФНЧ2 – двухзвенные Г-образные RC-фильтры с частотой среза 40 Гц.

Параметры элементов измерительной цепи $R_t=100$ Ом, $R_{оп}=800$ Ом. Измеряемый двухполюсник собран по схеме рис. 1, а ($C=100$ пФ, R меняется от 1 до 10 кОм). Частота следования импульсов $f_r=120$ кГц.

На рис. 6 приведены расчетная и экспериментальная зависимости погрешности измерения модуля комплексного сопротивления измеряемого двухполюсника в первом положении переключателя S ($q=2$) и активной составляющей комплексного сопротивления измеряемого двухполюсника во втором положении переключателя ($q=4$).

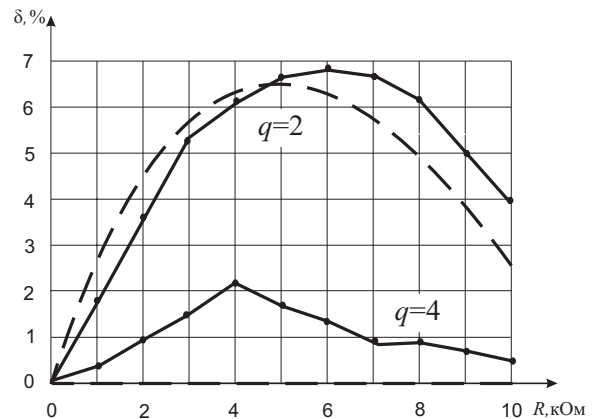


Рис. 6. Зависимость экспериментально измеренной (сплошная линия) и расчетной (пунктир) погрешности измерения модуля комплексного сопротивления двухполюсника ($q=2$) и активной составляющей комплексного сопротивления ($q=4$)

5. Заключение

Предложен метод измерения полных сопротивлений двухполюсников, включающий измерение модуля комплексного сопротивления и его действительной части с применением импульсного сигнала. Сущность метода заключается в изменении скважности импульсного сигнала, подаваемого на измерительную цепь при постоянной скважности сигнала на управляющих входах синхронных детекторов, что позволяет при неизменной схемной реализации устройства измерять два параметра полного сопротивления цепи – модуль и действительную часть. Метод отличается повышенной точностью (погрешность измерения модуля комплексного сопротивления $\pm 7\%$, его действительной части – $\pm 3\%$), применим для измерения полных сопротивлений двухполюсников с произвольной схемной реализацией, не требует применения магазина реактивностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марсов А.А., Евдокимов А.И. Автоматическое управление технологическими процессами на предприятиях строительной индустрии. – Л.: Стройиздат, 1975. – 416 с.
2. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 608 с.
3. Правила технической эксплуатации сетей проводного вещания / М-во связи РФ. Управление радио, телевидения и спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 1997. – 104 с.
4. Тартаковский Д.В., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений. – М.: Высшая школа, 2001. – 205 с.
5. Многопрограммное проводное вещание / В.Я. Дзядчик, С.А. Заславский, Б.Н. Филатов, А.В. Шершакова. – М.: Связь, 1974. – 303 с.
6. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей. – М.: Радио и связь, 1986. – 544 с.
7. Кривошеев Д.В., Туев В.И. Измерение модуля комплексного сопротивления двухполюсников // Научная сессия ТУСУР – 2005: Материалы всероссийской научно-технической конференции в 4 томах. Т. 3. – Томск: ТУСУР, 2005. – С. 72–75.