

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИММИТАНСА ДЛЯ УНИФИЦИРОВАННОГО КАНАЛА ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Аннотация

Актуальность и цели. При разработке информационно-измерительных и управляющих систем часто возникают задачи определения свойств материальных объектов, в частности диэлектрических, магнитных, электрохимических, биологических. Наиболее информативной характеристикой таких объектов является иммитанс (комплексное сопротивление или проводимость), определяющий реакцию объекта на гармоническое электрическое воздействие. Иммитанс выражается через ряд своих параметров, которые функционально связаны с параметрами объекта измерения (управления). Для измерения каждого параметра иммитанса разрабатывается специализированный измерительный канал системы. Цель исследования – разработка унифицированного канала информационно-измерительных и управляющих систем для измерения методом иммитансометрии различных параметров широкого круга объектов измерения и управления.

Материалы и методы. Исследование выполнено методом моделирования путем синтеза и анализа электрических и математических моделей объекта иммитансометрии и структурной модели канала информационно-измерительных и управляющих систем.

Результаты. Предложена комбинированная модель, объединяющая электрическую модель объекта иммитансометрии и математическую модель в виде совокупности уравнений связи, составляющих комплексного сопротивления объекта и его искомых параметров. Синтезирована структурная схема унифицированного канала измерения параметров объекта измерения (управления) методом иммитансометрии на основе измерительной схемы, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) иммитанса и вычислительного устройства канала. АЦП иммитанса состоит из АЦП напряжения, АЦП фазового сдвига, АЦП температуры, цифроаналогового преобразователя для формирования гармонического напряжения питания измерительной схемы и вычислительного устройства.

Выводы. Использование комбинированной модели объекта измерения (управления) вместо модели в виде многоэлементной линейной двухполюсной электрической цепи позволит существенно расширить область применения иммитансометрии в науке и технике, поскольку открывается возможность измерения параметров нелинейных объектов и объектов с термозависимым иммитансом. Предложенная структура АЦП иммитанса, включающая в себя АЦП напряжения, АЦП фазового сдвига, АЦП температуры и цифроаналогового преобразователя гармонического напряжения, при реализации по интегральной технологии позволит унифицировать аппаратную часть каналов измерения иммитанса информационно-измерительных и управляющих систем, эффективно используя вычислительные средства канала при решении измерительных задач. При разработке АЦП напряжения и АЦП фазового сдвига за основу следует принять структуру преобразователей информации с сигма-дельта-архитектурой, которые в настоящее время обладают наивысшей линейностью функции преобразования и могут быть полностью реализованы по интегральной технологии.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, информационно-измерительная система, управляющая система, иммитанс, иммитансометрия, цифровая обработка сигнала, сигма-дельта-архитектура.

V. N. Ashanin, V. A. Baranov, E. A. Lomtev, B. V. Tsypin

AN ANALOG-TO-DIGITAL IMMITANCE CONVERTER FOR A UNIFORM CHANNEL OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Abstract.

Background. In development of information and measurement and control systems there often occur problems of determining properties of material objects, in particular, dielectric, magnetic, electrochemical, biological objects. The most informative characteristic of such objects is immitance (impedance or conductivity), which reflects object's reaction on the harmonic electric effect. Immitance expressed in terms of quite a few of parameters which are functionally related to the parameters of measured (controlled) object. A special measuring channel of a system must be developed to measure each parameter of an object. The purpose of the work is to develop a unified information channel of measurement and control systems to measure various parameters of immitance of a measured object or of a controlled object.

Materials and methods. The research was performed using the methods of simulation through the analysis and synthesis of a mathematical model of an electrical object and a structural model of a channel of information-measuring and control systems.

Results. The combined model was developed, which embraced the electrical model and the mathematical model of the object as a set of equations. Those equations link components of the complex impedance of the object and its required parameters. A block diagram of the unified channel for measurement of parameters of the measured object (controlled object) was synthesized. The unified channel consists of a measuring circuit, an analog-digital converter (ADC) of immitance and a channel computing device. The immitance ADC consists of ADC voltage, ADC phase shift, ADC temperature, a digital - analog converter for generating harmonic voltage and a computing device.

Conclusions. The usage of the combined model of an object instead of a model in the form of a multi-element linear electrical circuit significantly expands the scope of immitance measurement in science and technology, as it opens a possibility of measuring parameters of non-linear objects and objects with immitance, which depends on temperature. The proposed structure of the immitance ADC can be realized by the integrated or hybrid technology. This will standardize hardware of measuring channels of measurement and control systems. A sigma-delta architecture of ADC has the highest linearity of conversion function and can be completely implemented by the integrated technology. This is the reason why this architecture should be used as a basis for design of voltage ADC and phase shift ADC.

Key words: analog-to-digital converter, information-measuring system, control system, immitance, immitance measurement, digital signal processing, sigma-delta architecture.

Введение

При разработке информационно-измерительных и управляющих систем часто возникают задачи определения свойств материальных объектов,

в частности диэлектрических, магнитных, электрохимических, биологических. Наиболее информативной характеристикой таких объектов является иммитанс, который определяется как составом и структурой материала, так и внешними условиями, которые влияют на параметры объекта измерения или управления (температура, давление, влажность и т.д.).

Иммитанс, комплексное сопротивление \dot{Z} (импеданс), или проводимость \dot{Y} (адмиттанс), описывает реакцию объекта на гармоническое электрическое воздействие

$$u(t) = U_m \sin \omega t \Rightarrow U_m e^{j\omega t} = \dot{U}_m,$$

где U_m и ω – амплитудное значение и круговая частота напряжения; t – время.

Математическая модель импеданса имеет четыре основные формы:

$$\dot{Z} = \frac{1}{\dot{Y}} = |\dot{Z}| e^{j\varphi} = R + jX = X(\operatorname{tg} \delta \pm j) = X \left(\frac{1}{Q} \pm j \right),$$

где $|\dot{Z}|$ – модуль комплексного сопротивления; φ – аргумент комплексного сопротивления (фазовый сдвиг между напряжением на объекте измерения и током через него); $R = |\dot{Z}| \cos \varphi$ и $X = |\dot{Z}| \sin \varphi$ – активная и реактивная составляющие комплексного сопротивления; $\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{R}{X}$ – тангенс угла потерь; $Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}$ – добротность.

В настоящее время моделью объекта измерения иммитанса является линейная пассивная многоэлементная двухполюсная электрическая цепь (ДЭЦ), составляемая из пассивных электрических сопротивлений, емкостей и индуктивностей [1].

В операторной форме иммитанс ДЭЦ определяется как коэффициент пропорциональности между изображениями по Лапласу напряжения $U(p)$, приложенного к ДЭЦ, и протекающего через нее тока $I(p)$:

$$U(p) = Z(p)I(p) \text{ или } I(p) = Y(p)U(p),$$

где $Z(p)$ и $Y(p)$ – операторные сопротивление и проводимость цепи; p – оператор преобразования Лапласа.

Аналитическое выражение $Z(p)$ представляют собой дробно-рациональную операторную функцию и является математической моделью ДЭЦ:

$$Z(p) = \frac{c_n p^n + c_{n-1} p^{n-1} + \dots + c_1 p + c_0}{c_{2n} p^n + c_{2n-1} p^{n-1} + \dots + c_{n-1} p},$$

где $c_i = u_i(x)$ – непрерывно дифференцируемые функции параметров x_i ; $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор параметров ДЭЦ; n – число независимых контуров двухполюсника [2].

Значения сопротивления R , емкости C , индуктивности L соответствующих элементов ДЭЦ определяют частотно независимые коэффициенты полиномов числителя и знаменателя и подлежат определению в процессе измерительного эксперимента. Существует однозначное соответствие между составом и структурой ДЭЦ и ее иммитансом.

1. Выбор математической модели двухполюсной электрической цепи

Основными требованиями к модели являются адекватность (соответствие объекту), простота для пользователя и ингерентность (степень согласованности модели с научной средой, в которой она используется) [3]. Электрическая модель в виде многоэлементной линейной пассивной ДЭЦ полностью адекватна объекту исследования только при измерениях параметров пассивных электронных компонентов, например при поэлементном контроле узлов электронной аппаратуры [4, 5]. Во всех других областях использования импедансометрии с большей или меньшей остротой возникает проблема адекватности параметров модели в виде ДЭЦ исследуемым свойствам объекта измерения или управления.

У большого числа объектов иммитансометрии в выражении для амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) частота имеет дробную степень в диапазоне $\{0,1\}$. Так, наиболее общей моделью АФХ относительной диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon}$ является уравнение Гаврильяка – Негами [6]:

$$\hat{\epsilon} = \frac{\epsilon_S - \epsilon_D}{\left[1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}\right]^{1-\beta}},$$

где ϵ_D – оптическая (динамическая) диэлектрическая проницаемость ($\omega \gg 1/\tau_0$); ϵ_S – статическая диэлектрическая проницаемость ($\omega \rightarrow 0$); τ_0 – наиболее вероятное значение времени релаксации; α – коэффициент распределения, $\alpha \in \{0,1\}$; β – коэффициент несимметричности, $\beta \in \{0,1\}$.

Оценивание относительной диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon} = \epsilon_1 - j\epsilon_2$ объекта из диэлектрического материала может осуществляться путем помещения его в диэлькометрический датчик (воздушный конденсатор с известной емкостью C_0). Здесь ϵ_1 – диэлектрическая проницаемость, ϵ_2 – диэлектрические потери.

При использовании в качестве электрической модели диэлектрической среды двухэлементной резистивно-емкостной ДЭЦ с параллельным соединением элементов модель диэлькометрического датчика с объектом измерения имеет вид, представленный на рис. 1.

Комплексное сопротивление \dot{Z}_X датчика можно представить в виде

$$\dot{Z}_X = \frac{1}{j\omega C_0(\epsilon_1 - j\epsilon_2)} = \frac{1}{\omega C_0\epsilon_2 + j\omega C_0\epsilon_1}.$$

Комплексное сопротивление моделирующей ДЭЦ определяется выражением

$$\dot{Z}_M = \frac{1}{1/R_X + j\omega(C_0 + C_X)}$$

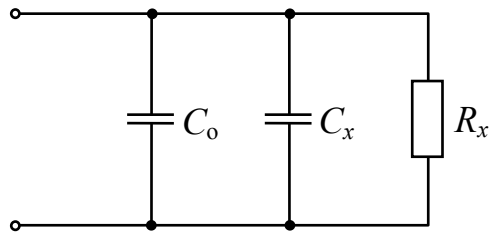


Рис. 1. ДЭЦ, моделирующая диэлектрический датчик с объектом измерения

Равенство $Z_X = Z_M$ имеет место при одновременном выполнении равенств $\omega C_0 \varepsilon_2 = 1/R_X$ и $\omega C_0 \varepsilon_1 = \omega(C_0 + C)$. Отсюда $\varepsilon_1 = (C_0 + C)/C_0$ и $\varepsilon_2 = 1/\omega R_X C_X = 1/\omega \tau_X$. Таким образом, модель диэлектрической среды в виде двухэлементной ДЭЦ позволяет оценить составляющие относительной диэлектрической проницаемости при определенной частоте приложенного гармонического напряжения. Однако АФХ относительной диэлектрической проницаемости при использовании этой модели не соответствует уравнению Гаврильяка – Негами.

В связи с этим в ДЭЦ, моделирующую объект исследования, часто вводятся виртуальные элементы в виде программно реализуемых математических моделей: элемент W (импеданс Варбурга), элемент G (импеданс Геришера), элемент CPE (импеданс постоянной фазы) [7].

Импеданс Варбурга определяется выражением

$$\dot{Z}_W = \frac{A_W}{\omega^{0,5}} - j \frac{A_W}{\omega^{0,5}},$$

где A_W – коэффициент Варбурга, Ом/с^{0,5},

$$A_W = \frac{N\Theta}{\sqrt{2}n^2FA} \left[\frac{1}{\sqrt{D_O}C_{S,O}} + \frac{1}{\sqrt{D_O}C_{S,R}} \right],$$

где N – универсальная газовая постоянная; Θ – абсолютная температура; F – постоянная Фарадея; A – площадь поверхности электрода; D_O – коэффициент диффузии электроактивных слоев, $C_{S,O}$, $C_{S,R}$ – поверхностные концентрации окисированной и ослабленной форм. Импеданс Варбурга часто используется при моделировании объектов с существенной зависимостью иммитанса от температуры.

Импеданс Геришера имеет два параметра Y_G и K_G и задается выражением

$$\dot{Z}_G = \left(Y_G \cdot (K_G + j\omega)^{0,5} \right)^{-1}.$$

Импеданс постоянной фазы описывается выражением

$$\dot{Z}_{CPE} = \frac{1}{(j\omega)^k C},$$

где C – электрическая емкость; k – безразмерный показатель степени, $0 < k \leq 1$.

При $k = 1$ CPE -элемент эквивалентен электрической емкости и создает фазовый сдвиг тока относительно напряжения 90° . При $k < 1$ CPE -элемент сохраняет постоянный фазовый сдвиг меньше 90° при изменениях частоты воздействия.

Необходимость использования этих и других, в том числе нелинейных и термозависимых, виртуальных элементов в электрических моделях обусловлена следующими проблемами, возникающими при исследованиях объектов и процессов различной природы методом иммитансометрии:

– невозможность синтеза модели в виде ДЭЦ, адекватной по АФХ объекту исследования, поскольку амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) объектов в ряде областей исследования имеет спад с крутизной менее 20 дБ/дек ($1/\omega$);

– у ряда видов физических объектов имеет место существенная нелинейность иммитанса, т.е. его зависимость от амплитуды приложенного гармонического напряжения;

– модель в виде ДЭЦ не отражает зависимость исследуемых свойств объекта от условий, в которых находится объект, прежде всего температуры, что на практике всегда имеет место в той или иной степени.

Анализ проблем исследования объектов различной природы методом иммитансометрии позволил сформулировать следующие задачи, требующие решения при проектировании каналов измерения иммитанса информационно-измерительных и управляющих систем:

– синтез модели объекта измерения иммитанса, пригодной для использования в любой области науки и техники;

– синтез структурной схемы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), позволяющего осуществлять совокупное и совместное преобразование составляющих иммитанса, действующего значения и частоты гармонического напряжения на объекте, температуры объекта и других величин, влияющих в общем случае на иммитанс.

В качестве универсальной модели объекта иммитансометрии предлагается комбинированная модель [8]. Модель является комбинацией электрического и математического компонентов. Электрический компонент представляет собой двухполюсный элемент с комплексным сопротивлением $\dot{Z} = R + jX$, а математический компонент – систему уравнений связи между составляющими комплексного сопротивления R , X и искомыми параметрами объекта исследования. На рис. 2 представлен электрический компонент комбинированной модели диэлькометрического датчика с объектом измерения.

Электрический компонент комбинированной модели, в отличие от моделей в виде многоэлементной ДЭЦ, остается неизменным при решении измерительных задач, отличающихся видом и числом определяемых парамет-

ров объекта. Изменениям подвергается только математический компонент, но поскольку он реализуется программно, это не ограничивает универсальность устройства для измерения иммитанса.

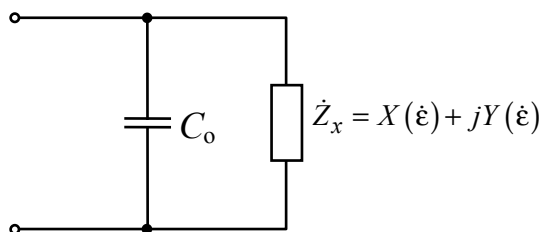


Рис. 2. Электрический компонент комбинированной модели дизелькометрического датчика с объектом измерения

Комбинированная модель объекта ингерентна иммитансометрии, поскольку процедура измерения составляющих иммитанса объекта эквивалентна процедуре измерения параметров элементов двухэлементной ДЭЦ при известной частоте гармонического напряжения на объекте. Адекватность комбинированной модели объекту измерений и ее ингерентность конкретной области исследований при внедрении иммитансометрии достигается использованием математических моделей, уже используемых в данной области знания.

2. Разработка унифицированного канала измерения иммитанса для информационно-измерительных и управляющих систем

Для измерений импеданса разработано достаточно большое количество реальных и виртуальных измерительных устройств [9, 10]. Однако существующие средства измерений не позволяют решить ряд измерительных задач, возникающих при расширении сферы использования иммитансометрии. Дальнейшее расширение номенклатуры средств измерений данного вида не решит, а лишь усугубит проблему. Наиболее перспективным путем представляется разработка универсального устройства для измерений иммитанса, первый этап которой должен состоять в синтезе универсальных моделей объекта и процесса измерения иммитанса.

Возможность разработки унифицированной аппаратной части канала измерения методом иммитансометрии для информационно-измерительных и управляющих систем основывается на адекватности и ингерентности комбинированной модели для всех областей применения иммитансометрии, неизменности электрического компонента, возможности использования математических моделей непосредственно в процессе измерения благодаря применению цифровых методов обработки измерительной информации средствами вычислительной техники.

Учитывая также, что физические процессы в объектах исследования являются непрерывными во времени, известные преимущества обработки информации в цифровом виде преопределили тенденцию преобразования измерительных сигналов в цифровую форму на возможно ранних стадиях процедуры измерения [11]. Это нашло отражение при разработке структурной схемы унифицированного канала информационно-измерительных и

управляющих систем для измерения параметров объекта исследования (управления) методом иммитансометрии, представленной на рис. 3.

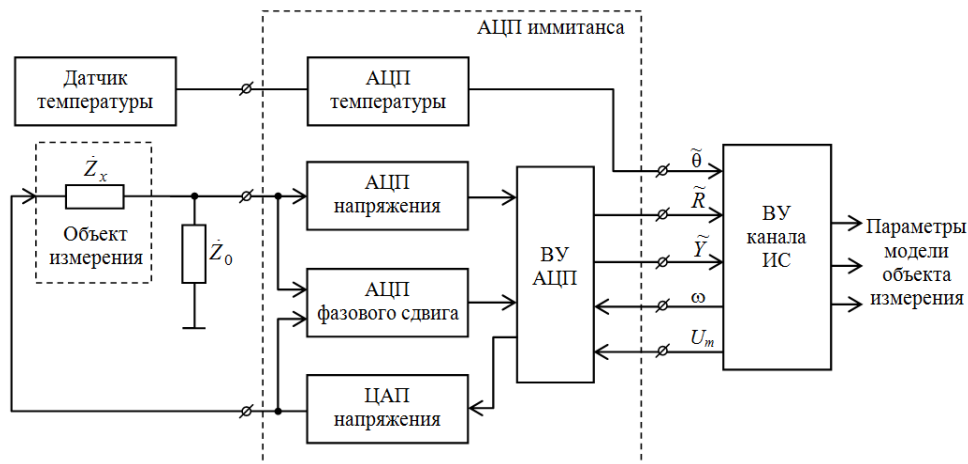


Рис. 3. Структурная схема унифицированного канала информационно-измерительных и управляющих систем для измерения параметров объекта исследования (управления) методом иммитансометрии

Унифицированный канал состоит из следующих основных компонентов:

- измерительная схема в виде делителя напряжения, как показано на рис. 3, или моста переменного тока, образуемая электрически соединенными объектом измерения (управления) в виде двухполюсника с сопротивлением Z_x и опорной ДЭЦ с сопротивлением Z_0 , которое может быть как регулируемым, так и нерегулируемым;

- АЦП иммитанса, включающий АЦП действующего значения гармонического напряжения, АЦП фазового сдвига напряжений на элементах измерительной схемы, АЦП температуры и вычислительное устройство (ВУ), осуществляющее вычисление составляющих иммитанса по значениям амплитуды и фазового сдвига напряжений на элементах измерительной схемы;

- программируемое вычислительное устройство (ВУ канала), осуществляющее вычисление значений искомых параметров объекта исследования или управления в соответствии с математическим компонентом комбинированной модели по значениям кодов результатов преобразования составляющих иммитанса и температуры и заданным ВУ канала информационно-измерительной или управляющей системы частоте и амплитуде гармонического напряжения на объекте измерения.

АЦП иммитанса функционирует в составе измерительного канала информационно-измерительной или управляющей системы следующим образом. ВУ канала передает ВУ АЦП информацию об амплитуде U_m и частоте ω гармонического напряжения питания $u_X(t)$ измерительной схемы. ВУ задает эти параметры подпрограмме управления цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) и формирует сигнал начала генерирования напряжения питания. На входы АЦП иммитанса начинают поступать выходное напряжение

$u_X(t)$ измерительной схемы и выходной сигнал датчика температуры объекта исследования обычно также в виде напряжения. Выходными сигналами АЦП являются коды значений составляющих R и X иммитанса \dot{Z}_X и температуры Θ объекта измерения.

Очевидно, что область применения унифицированного канала будет расширяться по мере повышения точности измерения составляющих иммитанса. В связи с этим при разработке АЦП напряжения и АЦП фазового сдвига за основу следует принять структуру преобразователей информации с $\Sigma\Delta$ -архитектурой, которые обладают уникальными метрологическими и эксплуатационными характеристиками: высокими линейностью функции преобразования и помехоустойчивостью, низким энергопотреблением [12, 13]. Однако при этом необходимо учитывать, что они относятся к сигнальным АЦП и имеется проблема привязки результата измерения к моменту окончания процедуры измерения, возникающая из-за цифровой фильтрации выходного сигнала $\Sigma\Delta$ -модулятора [14]. Возможным вариантом исключения этой проблемы видится применение ΣT -АЦП [12, 15, 16].

Измерение составляющих иммитанса при алгебраической форме представления комплексной величины $\dot{Z} = R + jX$ можно рассматривать как совокупные измерения однородных величин R и X , при показательной форме – как совместные измерения разнородных величин $|\dot{Z}|$ и φ . Снять различие между совместными и совокупными измерениями в отношении размерности при разработке универсального измерителя и свести все измерения к совокупным позволяет переход от абсолютных измерений к относительным. При относительных измерениях все величины являются безразмерными. Отличительной особенностью совместных измерений является математическая модель в виде системы уравнений измерения, число которых не меньше числа измеряемых величин. Показательная форма комплексного числа представляется предпочтительной для относительных измерений, поскольку аргумент φ уже является относительной величиной:

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta T}{T} = \omega\Delta T,$$

где ΔT – длительности интервала времени между равными мгновенными фазами периодических сигналов равной частоты; T – длительность периода гармонических сигналов.

Измерение аргумента φ комплексного сопротивления осуществляется АЦП фазового сдвига путем аналого-цифрового преобразования длительности ΔT интервала времени между равными мгновенными фазами напряжения питания измерительной схемы и напряжения на опорной ДЭЦ. Результат этого аналого-цифрового преобразования $N_{\Delta T} = \Delta T/1T$ и код $N_T = T/1T$ периода T гармонических напряжений используются для формирования кода $N_\varphi = 2\pi N_{\Delta T}/N_T$ аргумента φ .

Аналого-цифровое преобразование при относительном измерении модуля комплексного сопротивления определяется выражением

$$N_Z = \frac{|\dot{Z}_X|/1_Z}{|\dot{Z}_0|/1_Z},$$

где \dot{Z}_0 – известное комплексное сопротивление опорной ДЭЦ с модулем $|\dot{Z}_0|$ и аргументом φ_0 , 1_Z – единица комплексного сопротивления, Ом.

Единица 1_Z комплексного сопротивления может быть определена в трех формах:

$$1_Z = 1_{ZR} = 1_{ZC} = 1_{ZL},$$

где 1_{ZR} – единица с размерностью [ОмГцГц⁻¹], производная от единицы 1_R сопротивления R ; 1_{ZC} – единица с размерностью [Гц⁻¹С⁻¹], производная от единицы 1_C емкости C ; 1_{ZL} – единица с размерностью [ГцГн], производная от единицы 1_L индуктивности L .

Если комплексное сопротивление объекта нелинейно, единице 1_Z приписывается размерность [ОмГцГц⁻¹ВВ⁻¹]. В случаях, когда комплексное сопротивление объекта термозависимо, единице 1_Z приписывается размерность [ОмГцГц⁻¹ΘΘ⁻¹] и т.д.

Размерность, приписываемая единице комплексного сопротивления, указывает, мера какой пассивной электрической величины используется для воспроизведения единицы. Размерность, приписываемая значениям составляющих комплексного сопротивления, указывает, что они получены при приложении к объекту измерения гармонического напряжения и должны сопровождаться значениями величин, составивших размерность (частота напряжения, амплитуда напряжения, температура объекта измерения и т.д.) и влиявших на объект исследования в процессе измерения.

В задачах, где требуется определение трех и более параметров объекта исследования, связанных с иммитансом, дополнительные уравнения измерения могут синтезироваться следующими способами:

- изменение параметров элементов опорной ДЭЦ измерительной схемы;
- изменение частоты гармонического напряжения, приложенного к объекту;
- изменение амплитуды гармонического напряжения, приложенного к объекту (при нелинейности объекта исследования);
- изменение температуры объекта исследования;
- изменение других величин, влияющих на иммитанс объекта исследования.

Заключение

Использование комбинированной модели объекта измерения (управления) вместо модели в виде многоэлементной линейной ДЭЦ позволит существенно расширить область применения иммитансометрии в различных областях науки и техники, поскольку открывается возможность измерения пара-

метров нелинейных объектов, объектов, имеющих не дробно-полиномиальную АЧХ, объектов с термозависимым иммитансом.

Предложенная структура АЦП иммитанса, включающая в себя АЦП напряжения, АЦП фазового сдвига, АЦП температуры и ЦАП гармонического напряжения, при реализации по интегральной технологии позволит унифицировать аппаратную часть каналов измерения иммитанса информационно-измерительных и управляющих систем, эффективно используя вычислительные средства канала при решении измерительных задач.

При разработке АЦП напряжения и АЦП фазового сдвига за основу следует принять структуру преобразователей информации с сигма-дельта-архитектурой, которые в настоящее время обладают наивысшей точностью преобразования и могут быть полностью реализованы по интегральной технологии.

Список литературы

1. **Мартяшин, А. И.** Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения / А. И. Мартяшин, Э. К. Шахов, В. М. Шляндин. – М. : Энергия, 1976. – 392 с.
2. **Кнеллер, В. Ю.** Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
3. **Новиков, А. М.** Методология / А. М. Новиков, Д. А. Новиков. – М. : СИНТЕГ, 2007. – 668 с.
4. **Цыпин, Б. В.** Методы диагностики и измерительные преобразователи для приборов и систем контроля узлов электронной аппаратуры : учеб. пособие / А. И. Мартяшин, Б. В. Цыпин. – Пенза : Изд-во ППИ, 1989. – 80 с.
5. **Мартяшин, А. И.** Методы поэлементного контроля электронных схем: Обзорная информация / А. И. Мартяшин, Л. В. Орлова, Б. В. Цыпин. – Вып. 1. – М. : ЦНИИТЭИ приборостроения, 1983. – 32 с. – (Серия ТС-5. Приборы, средства автоматизации и системы управления).
6. **Ахадов, Я. Ю.** Диэлектрические параметры чистых жидкостей / Я. Ю. Ахадов. – М. : Изд-во МАИ, 1999. – 856 с.
7. URL: <http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analyser/parameters.html>.
8. **Баранов, В. А.** Измерения параметров композиционных диэлектрических материалов / В. А. Баранов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2008. – 124 с.
9. **Добровинский, И. Р.** Проектирование ИИС для измерения параметров электрических цепей / И. Р. Добровинский, Е. А. Ломтев. – М. : Энергоатомиздат, 1997. – 120 с.
10. **Цыпин, Б. В.** Измерение импедансов системами с ЭВМ / Б. В. Цыпин. – Пенза : ПГУ, 2001. – 100с.
11. **Ашанин, В. Н.** Проблемы теории анализа и синтеза средств измерений гетерогенной структуры / В. Н. Ашанин // Датчики и системы. – 2011. – № 7. – С. 2–7.
12. **Ашанин, В. Н.** $\Sigma\Delta$ -аналого-цифровые преобразователи: основы теории и проектирование : моногр. / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПенГУ, 2009. – 188 с.
13. **Ашанин, В. Н.** Анализ состояния и тенденций производства интегральных преобразователей информации с $\Sigma\Delta$ -архитектурой / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, А. А. Коротков, И. А. Сидорова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 1 (29). – С. 26–35.
14. **Ашанин, В. Н.** Метод определения длительности переходного процесса в $\Sigma\Delta$ -АЦП с однобитным Δ -модулятором высокого порядка / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Р. Г. Тер-Аракелян // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 3 (15). – С. 70–81.

15. Шахов, Э. К. Реализация концепций $\Sigma\Delta$ -АЦП в интегрирующих АЦП с другими видами импульсной модуляции / Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин, А. И. Надеев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Сер. Технические науки. – 2006. – № 6. – С. 226–236.
16. Ашанин, В. Н. Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования : моногр. / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2009. – 214 с.

References

1. Martyashin A. I., Shakhov E. K., Shlyandin V. M. *Preobrazovateli elektricheskikh parametrov dlya sistem kontrolya i izmereniya* [An electrical parameters converter for measuring and control systems]. Moscow: Energiya, 1976, 392 p.
2. Kneller V. Yu., Borovskikh L. P. *Opredelenie parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov* [Determination of parameters of multi-element two-terminal devices]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p.
3. Novikov A. M., Novikov D. A. *Metodologiya* [Methodology]. Moscow: SIN-TEG, 2007, 668 p.
4. Tsylin B. V., Martyashin A. I. *Metody diagnostiki i izmeritel'nye preobrazovateli dlya priborov i sistem kontrolya uzlov elektronnoy apparatury: ucheb. posobie* [Diagnostics and measuring converters for electronic equipment's node control systems and devices]. Penza: Izd-vo PPI, 1989, 80 p.
5. Martyashin A. I., Orlova L. V., Tsylin B. V. *Metody poelementnogo kontrolya elektronnykh skhem: Obzornaya informatsiya* [Methods of element-by-element check of electronic systems]. Issue. 1. Moscow: TsNIITEI priborostroeniya, 1983, 32 p. (Seriya TS-5. Pribory, sredstva avtomatizatsii i sistemy upravleniya).
6. Akhadov Ya. Yu. *Dielektricheskie parametry chistykh zhidkostey* [Dielectric parameters of pure liquids]. Moscow: Izd-vo MAI, 1999, 856 p.
7. Available at: <http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analyser/parameters.html>.
8. Baranov V. A. *Izmereniya parametrov kompozitsionnykh dielektricheskikh materialov* [Measuring of composite dielectric material parameters]. Penza: Inf.-izd. tsentr PenzGU, 2008, 124 p.
9. Dobrovinskiy I. R., Lomtev E. A. *Proektirovanie IIS dlya izmereniya parametrov elektricheskikh tsepey* [Designing information-measuring systems for electrical circuit parameters measuring]. Moscow: Energoatomizdat, 1997, 120 p.
10. Tsylin B. V. *Izmerenie impedansov sistemami s EVM* [Impedance measuring by computer systems]. Penza: PGU, 2001, 100 p.
11. Ashanin V. N. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2011, no. 7, pp. 2–7.
12. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *$\Sigma\Delta$ -analogo-tsifrovye preobrazovateli: osnovy teorii i proektirovanie: monogr.* [$\Sigma\Delta$ -analog-digital converters: theory and design: monograph]. Penza: Inf.-izd. tsentr PenGU, 2009, 188 p.
13. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Korotkov A. A., Sidorova I. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 1 (29), pp. 26–35.
14. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Ter-Arakelyan R. G. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 3 (15), pp. 70–81.
15. Shakhov E. K., Ashanin V. N., Nadeev A. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Ser. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Ser. Engineering sciences]. 2006, no. 6, pp. 226–236.
16. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *Teoriya integriruyushchego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya: monogr.* [Theory of integrating analog-digital conversion: monograph]. Penza: Inf.-izd. tsentr PenzGU, 2009, 214 p.

Ашанин Василий Николаевич

кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

Ashanin Vasily Nikolaevich

Candidate of engineering sciences,
professor, head of sub-department
of electrical power and electrical
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Баранов Виктор Алексеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: baranov_va2202@mail.ru

Baranov Viktor Alekseevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of information-
measuring technology and metrology,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Ломтев Евгений Александрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

Lomtev Evgeniy Aleksandrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of information-measuring
technology and metrology, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Цыпин Борис Вульфович

доктор технических наук, профессор,
кафедра ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: cypin@yandex.ru

Tsypin Boris Vul'fovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of space-rocket and aircraft
instrument engineering, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 621.3.098.2

Ашанин, В. Н.

Аналого-цифровой преобразователь иммитанса для унифицированного канала информационно-измерительных и управляющих систем / В. Н. Ашанин, В. А. Баранов, Е. А. Ломтев, Б. В. Цыпин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 4 (36). – С. 96–108.