

УДК 621.317.335

**Ю. Г. Подкин**, доктор технических наук, профессор, Сарапульский политехнический институт (филиал) Ижевского государственного технического университета  
**Т. Г. Чикуров**, кандидат технических наук, Сарапульский политехнический институт (филиал) Ижевского государственного технического университета

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

*Разработана установка и предложена методика измерения времени релаксации и удельного сопротивления диэлектрических дисперсных систем на низких и инфранизких частотах электромагнитного поля с одновременным преобразованием измеряемого параметра в периодическую импульсную последовательность. Погрешность измерительного преобразования не превышает 1 % в диапазоне емкостей и сопротивлений измерительного преобразователя  $C_x = 0...400$  нФ и  $R_x = 1...100$  МОм.*

**Ключевые слова:** дисперсные системы, диэлькометрия, диэлектрические характеристики, время релаксации.

Дисперсные системы (ДС) – суспензии, коллоиды, полиморфные структуры, композиты, биологические объекты, строительные и пищевые материалы – широко используются в науке и практике. При изучении электрофизических свойств таких объектов чаще всего измеряют диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon$ ), удельную проводимость ( $\sigma$ ) и диэлектрические потери ( $\text{tg}\delta$ ) в широком интервале частот и энергетических воздействий. По полученным частотным характеристикам при помощи комплекса методов обработки диэлектрических спектров [1, 2] выявляют состав, структуру и кинетику процессов, протекающих в ДС.

В отличие от простых веществ, диэлектрические спектры которых определяются несколькими высокочастотными механизмами релаксационной и упругой поляризации [3], в ДС на границах раздела фаз возникают переходные слои, новообразования [4], а в неравновесных ДС при массопереносе формируются волны диэлектрической проницаемости, перемещающиеся от центра с максимальным градиентом химического потенциала на периферию неравновесной области [1]. Это приводит к появлению новых, низкочастотных механизмов поляризации, в том числе индуцированных процессами структурообразования, причем время релаксации вновь образованных синергетических структур хорошо коррелирует с характеристическими размерами структурных элементов.

В результате суперпозиции перечисленных механизмов диэлектрические спектры ДС значительно отличаются от спектральных характеристик более простых материалов. В них появляются дополнительные дисперсионные области, отражающие каждый вид структурной поляризации. При необходимости выявления конкретной группы структурных элементов достаточно определить границы соответствующих частотных областей дисперсии. Обычно с этой целью используют диаграммы Коула – Коула [4], то есть снимают частотные характеристики  $\epsilon(\omega)$ ,  $\sigma(\omega)$ , строят годограф  $\sigma(\epsilon)$ , по которому и определяют частоту дисперсии. Однако в системах с широким набором времени релаксации этот метод дает боль-

шую погрешность из-за сильного размывания и деформации диэлектрических спектров. Кроме того, он сложен и технически, поскольку серийно диэлькометрические спектроанализаторы не выпускаются, а использование экспериментальных установок на основе измерителей параметров  $CG$ -двухполюсников, измерителей импеданса и  $Q$ -метров не обеспечивает необходимой оперативности единичного измерения.

Гораздо удобнее анализировать переходные процессы, возникающие в гетерогенных диэлектриках при воздействии импульсных полей. Реакция дисперсной системы на единичный скачок напряжения идентична переходным процессам в  $CG$ -двухполюсниках при импульсном воздействии. В случае ДС эквивалентный  $C_x G_x$ -двухполюсник состоит из сложной композиции проводимостей  $G_i$ , сопротивлений  $R_j$ , отражающих все виды потерь, включая релаксационные и сквозную проводимость, и емкостей  $C_i$ ,  $C_j$ , поэтому его идеализированная релаксационная кривая  $U(t)$  определяется всей совокупностью времени релаксации  $\tau_i$ ,  $\tau_j$ , т. е. оказывается ступенчатой (рис. 1) [1, 2, 4]. Реальная кривая обычно сглажена [1, 4], так как частичные спектры перекрываются. Поэтому для исследования соответствующих видов или групп структурных элементов необходимо выделять отдельные фрагменты этой кривой и, таким образом, снижать шумовой фон, создаваемый неинформативными релаксационными процессами.



Рис. 1. Идеализированная релаксационная кривая

Для реализации этого принципа следует облучить образец импульсом поля и просканировать его реак-

цию во времени, а для удобства последующей цифровой обработки желательно выходной сигнал сформировать в виде импульсной последовательности, как в [5]. Такое совмещение операций возможно, если фронты воздействующего и выходного импульсов совпадают, а окончание исследуемого релаксационного процесса формирует срез выходного импульса.

Наиболее просто эти требования реализуются в широко известном мультивибраторе на операционном усилителе [6]. При обычном включении на инвертирующий вход операционного усилителя (ОУ) вводят обратную связь через интегрирующую цепь  $G_n, C_n$  (рис. 2), а на неинвертирующем входе резистивным делителем напряжения  $Y_1 = G_1, Y_2 = G_2$  задают опорное напряжение  $U_n$ , которое определяет момент переключения схемы (рис. 3). В технике релаксометрии емкость  $C_n$  заменяют на емкостный датчик с веществом, моделируемый эквивалентным двухполосником  $C_x G_x$ .

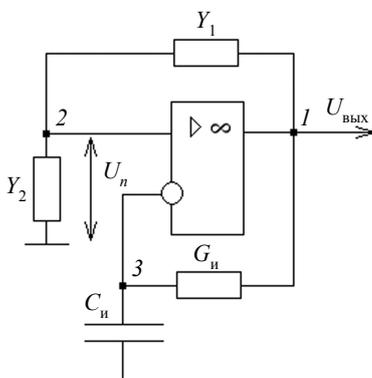


Рис. 2. Базовый модуль преобразования

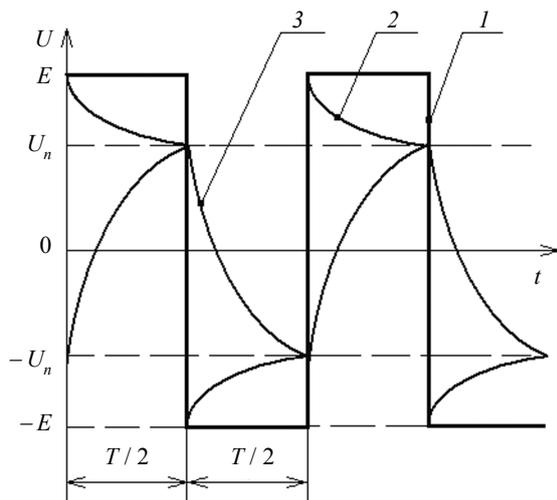


Рис. 3. Переходные процессы в базовом модуле: 1 – форма импульсов в узле 1; 2 – форма импульсов в узле 2 в режиме дифференцирования; 3 – форма импульсов в узлах 2 и 3 в режиме интегрирования

Однако такой преобразователь обладает существенными недостатками. Во-первых, угол схождения релаксационной кривой и порогового напряжения

очень мал, что приводит к большой погрешности определения времени релаксации. Во-вторых, сквозная проводимость ДС шунтирует емкость  $C_x$ , что искажает результаты измерений и может привести к срыву генерации.

Вместе с тем обеспечить измерение времен релаксации диссипативных ДС с четкой фиксацией момента переключения можно и в базовой схеме мультивибратора на ОУ (рис. 2), для чего достаточно разделить функции формирования релаксационной кривой и выходной импульсной последовательности по входам ОУ. Это возможно, если положительную обратную связь (ПОС) ввести через функционально полную цепь (рис. 4).

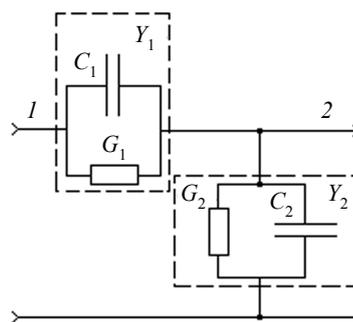


Рис. 4. Модифицированная цепь ПОС

Операторный коэффициент передачи этой цепи

$$K(p) = \frac{G_1 + pC_1}{G_1 + C_2 + p(C_1 + C_2)}, \quad (1)$$

а изображения входного и выходного напряжений, соответственно,

$$U_1(p) = \frac{E + U}{p}; \quad (2)$$

$$U_2(p) = U(p)K(p) - U_n/p. \quad (3)$$

Обозначим  $\frac{C_1 + C_2}{G_1} = \tau_1; \frac{C_1 + C_2}{G_1 + G_2} = \tau_2;$

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} = C; \quad \frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{G_1}{G_1 + G_2} = g,$$

где  $C$  и  $g$  – нормированные значения емкости и проводимости;  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – постоянные времени. Тогда

$$K(p) = \frac{1}{\tau_1} \frac{1}{p + 1/\tau_2} + C \frac{p}{p + 1/\tau_2}, \quad (4)$$

$$U_2(p) = (E + U) \left[ \frac{g/\tau_2}{p(p + 1/\tau_2)} + C \frac{1}{p + 1/\tau_2} \right] - \frac{U_n}{p}. \quad (5)$$

Перейдем к оригиналу

$$U_2(t) = (E + U_n) [g + (C - g) \exp(-t/\tau_2)] - U_n. \quad (6)$$

Это напряжение вводится на неинвертирующий вход. Его форма зависит от соотношения элементов

схемы (рис. 4) и варьируется от кривой 2 до кривой 3 (рис. 3). На инвертирующем входе

$$U_{\text{и}}(t) = (E + U_{\text{н}})(1 - \exp(-t/\tau_{\text{и}})) - U_{\text{н}}, \quad (7)$$

где  $\tau_{\text{и}} = \frac{C_{\text{и}}}{G_{\text{и}}}$ . Тогда при равенстве  $U_3(t) = U_2(t) = U_{\text{н}}$ ,

наступающем при  $t = T/2$ , происходит автоматическое переключение схемы в инверсное состояние, и

$$T = 2\tau_{\text{и}} \ln \frac{(C - g) \exp\{(-T/2)(1/\tau_2 + 1/\tau_{\text{и}})\} + 1}{1 - g}. \quad (8)$$

Полученное уравнение трансцендентное, и решать его следует численным методом. Однако если выполнить условие

$$(C - g) \exp\{(-T/2)(1/\tau_2 - 1/\tau_{\text{и}})\} \gg 1, \quad (9)$$

то есть реализовать интегродифференцирующий режим (компромисс расчетных кривых 2 и 3, (рис. 3)), то период преобразования определяется в основном постоянной времени  $\tau = R_2 C_2$ , или при замене этих элементов исследуемым образцом  $R_x C_x$  – его временем релаксации:

$$T = 2\tau_{\text{и}} \left\{ \ln(C_1 R_1 - C_2 R_2) - \ln[R_1(C_1 + C_2)] \right\}. \quad (10)$$

Поскольку рациональным выбором элементов  $G_1$ ,  $C_1$  легко обеспечить встречное изменение напряжений на входах ОУ, угол схождения релаксационной кривой и экспоненты заряда конденсатора  $C_{\text{и}}$  значительно возрастает, что повышает стабильность фиксации  $\tau$ . Кроме того, параметры двухполюсника не влияют на условия самовозбуждения мультивибратора, поэтому опасность срыва колебаний снижается. Изменение постоянной времени цепи  $R_{\text{и}} C_{\text{и}}$  позволяет исследовать нужные фрагменты релаксационной кривой, поэтому нет необходимости в ее полном сканировании.

Преобразователь обладает еще одним привлекательным свойством. При условии

$$(C - g) \exp\{-T/2(1/\tau_2 - 1/\tau_{\text{и}})\} \ll 1 \quad (11)$$

и фиксированных  $\tau_{\text{и}}$  и  $G_1$  цепь ПОС работает в режиме интегрирования (кривая 3, рис. 3), и период определяется только проводимостью  $G_2$ :

$$T = 2\tau_{\text{и}} \ln(1 + G_1/G_2). \quad (12)$$

При этом реализуется логарифмическое преобразование относительного сопротивления  $R_x/R_1 = G_1/G_2$  в период, инвариантное к  $C_x$ , что позволяет без модификации схемы перейти в режим кондуктометрии с широким динамическим диапазоном по сопротивлению. Таким образом, простой сменой режима схема (рис. 2) с цепью ПОС (рис. 4), включающей исследуемый ПИП, может использоваться как логарифмический преобразователь  $\tau \rightarrow T$  или  $R \rightarrow T$ .

Для испытания и рабочего использования преобразователя необходима исследовательская установка (рис. 5). Она содержит емкостный первичный измерительный преобразователь (ПИП) 1, преобразователь  $\tau \rightarrow T$  ( $R \rightarrow T$ ) 2, буфер 3 и частотомер 4. ОУ преобразователя 2 должен обладать высоким входным сопротивлением и быстродействием. Величины  $C_x$ ,  $G_x$  определяются конструкцией ПИП и свойствами исследуемого материала, поэтому цепь  $G_1$ ,  $C_1$  адаптируется к условиям эксперимента. Учитывая широкий динамический диапазон преобразования, целесообразно рассчитать требуемые значения  $G_1$ ,  $C_1$  и ввести в схему соответствующие радиоэлементы с сосредоточенными параметрами. В режиме преобразования  $R \rightarrow T$  цепь  $C_{\text{и}}$ ,  $G_{\text{и}}$  задает частотную область, поэтому выбирается исходя из требований частотного диапазона.

Буфер 3 предназначен для развязки преобразователя и внешних приборов и в простейшем случае состоит из токоограничивающего сопротивления величиной 1 МОм и инвертора КМОП. Полезно использовать многокаскадный буфер и экранирование. Предельные условия (9) и (11) обеспечивают подбором величин сопротивлений  $R_1 = 1/G_1$ ,  $R_{\text{и}}$  и емкости  $C_{\text{и}}$ .

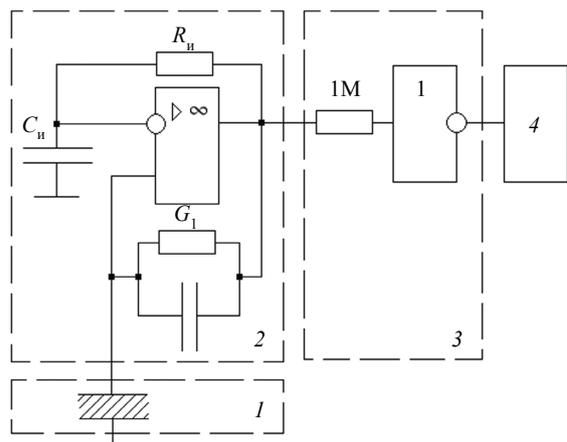


Рис. 5. Схема исследовательской установки: 1 – емкостный ПИП; 2 – базовый модуль на ИМС ОУ КР574УД2; 3 – буферный элемент на ИМС логики серии К561; 4 – частотомер (ЧЗ-34)

Испытания установки проведены на инфранизких и низких частотах до 1 кГц. Установлено, что в режиме  $\tau \rightarrow T$  при  $C_{\text{и}} = 4400$  пФ,  $R_{\text{и}} = 1$  МОм,  $C_1 = 4400$  пФ,  $R_1 = 20$  МОм абсолютная погрешность преобразования  $\Delta T$  для диапазона  $R_x = 1/G_x = 1 \dots 100$  МОм и  $C_x = 0 \dots 40$  пФ не превышает 0,5 %, при  $C_x = 40 \dots 400$  пФ – менее 1 %. При работе установки в режиме преобразования  $R_x \rightarrow T$  с элементами  $C_{\text{и}} = 4400$  пФ,  $R_{\text{и}} = 1$  МОм,  $C_1 = 4400$  пФ,  $R_1 = 1$  МОм для тех же значений  $R_x$  и  $C_x$ ,  $\Delta T$ , соответственно, не превышает 0,5 и 1 %.

#### Библиографические ссылки

1. Подкин Ю. Г. Теоретические основы дизелькометрического контроля неравновесных дисперсных систем. – М. : Научтехлитиздат, 2003. – 159 с.

2. Чикуров Т. Г. Алгоритмы повышения точности при диэлектрических измерениях // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права : науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. – М. : МГАПИ, 2000. – С. 188–192.

3. Фрелих Г. Теория диэлектриков. – М. : ИЛ, 1960. – 248 с.

4. Челидзе Т. Л., Деревянко А. И., Куриленко О. Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. – Киев : Наук. думка, 1977. – 231 с.

4. Пат. № 2260190 (Россия), МКИ G01R 27/26 / Релаксационный измеритель параметров  $CG$ -двухполосников / Подкин Ю. Г., Мишков М. Ю. Заявл. 06.02.2004. – № 2004103523/28 (Россия) ; опубл. 10.09.2005. Бюл. 25.

5. Подкин Ю. Г., Чикуров Т. Г., Данилов Ю. В. Электротехника и электроника. – Т. 2. – М. : Академия, 2011. – 314 с.

Yu. G. Podkin, Doctor of Technical Sciences, Professor; Sarapul Polytechnical Institute, Branch of Izhevsk State Technical University  
T. G. Chikurov, Candidate of Technical Sciences, Sarapul Polytechnical Institute, Branch of Izhevsk State Technical University

#### Installation for Relaxation Processes Research

*The installation and the technique of measurement of relaxation time of a specific resistance of dielectric disperse systems on low and infra low frequencies of an electromagnetic field with simultaneous transformation of the measured parameter to periodic pulse sequence is considered. The error of measuring transformation is less than 1 % in a range of capacitance  $C_x = 0...400$  pF and resistance  $R_x = 1..100$  MOhm.*

**Key words:** disperse systems, dielectric measurement, dielectric characteristics, relaxation time.

УДК 681.584.71

**И. В. Абрамов**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет

**А. И. Абрамов**, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет

**И. А. Никитин**, магистрант, Ижевский государственный технический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ УСТРОЙСТВА БЕСКОНТАКТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МЕХАТРОННОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МОДУЛЯ\*

*Приведена математическая модель расчета параметров модуля бесконтактной передачи электроэнергии для питания электронного блока управления и исполнительного привода мехатронного инструментального модуля, результаты численного эксперимента.*

**Ключевые слова:** мехатронный инструментальный модуль, система беспроводной передачи энергии, коэффициент связи контуров, геометрические параметры магнитопровода.

**Т**енденциями развития промышленного оборудования является повышение производительности путем концентрации технологических операций на одном станке, расширение гибкости и функциональности с помощью интеллектуальных инструментальных устройств, выполняющих основные технологические операции обработки. Проблема интеграции подобных устройств в обрабатывающие центры и роботизированные системы связана с высокими скоростями взаимного перемещения элементов, наличием агрессивных сред (масляный туман, СОЖ, пыль), высоких температур и негативных механических воздействий (вибрация, попадание стружки). Обеспечение питанием подобных устройств, совершающих вращательное либо поступательное движение, выполняется с помощью контактных и бесконтактных систем. В контактных системах как правило используются скользящий контакт или токосъемные кольца с жидкометаллическими средами. Недостатком скользящего контакта

является его низкая долговечность из-за механического износа вследствие наличия соприкасающихся частей, подверженность химическим воздействиям, а также искрообразование в месте контакта. Система токосъемных колец с жидкометаллическими средами сложна и неэффективна в случае с быстро и часто заменяемыми инструментальными устройствами. Бесконтактный способ имеет ряд ключевых преимуществ для применения в станочных системах: отсутствие механического износа, отсутствие потребности в обслуживании, высокая надежность, возможность электрической изоляции источника и приемника, а также выполнение их в защищенном корпусе. Среди бесконтактных способов передачи энергии наиболее надежной и универсальной является система, основанная на эффекте электромагнитной индукции.

В статье рассматривается разработанная бесконтактная система питания для быстросменного мехатронного инструментального модуля (МИМ) [1]. МИМ предназначен для выполнения операций рас-

© Абрамов И. В., Абрамов А. И., Никитин И. А., 2011

Получено 27.06.11

\* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы в ГОУ ВПО «ИжГТУ» (государственный контракт № П723).