

УДК 681.518.3, 681.518.5

Н. В. Егоров, А. Г. Карпов

Санкт-Петербургский государственный университет

В. В. Яновский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Система исследования диэлектрических материалов с помощью широкополосной диэлектрической спектроскопии

Представлены аппаратные и программные средства исследования диэлектрических материалов с помощью широкополосной диэлектрической спектроскопии. Техническими принципами работы аппаратуры являются следующие: воздействие на исследуемый образец осуществляется с помощью «ступенчатого» электрического поля для обеспечения широкополосной спектроскопии; учет цифрового характера регистрации информации позволяет заменить измерение аналогового сигнала отклика диэлектрического образца на регистрацию моментов времени достижения этим сигналом уровней, соответствующих цифровым кодам; обеспечение автоматического контроля адекватности скорости нарастания отклика диэлектрического образца быстрдействию компьютерной системы регистрации. Представленное математическое и программное обеспечение позволяет реализовать получение и визуализацию комплексной диэлектрической проницаемости в реальном масштабе времени. Метод и структура математического обеспечения позволяют реализовать его в компактной компьютерной системе, подходящей для использования в технологических процессах и «бортовых системах».

Диэлектрические материалы, широкополосная диэлектрическая спектроскопия, диэлектронетр, комплексная диэлектрическая проницаемость, преобразование Фурье с помощью квадратурных формул

В настоящее время все большее распространение получают как природные, так и синтетические диэлектрические материалы. К природным диэлектрическим материалам прежде всего надо отнести керамику, материалы на основе стекла, материалы на тканевой основе (например, давно известный текстолит) и материалы на древесной основе. Если 2 последних типа материалов можно считать устаревшими, то 2 первых, несомненно, остаются актуальными. Помимо бытового применения керамические изделия остаются самым высококачественным изолирующим материалом, обладающим высокими конструктивными свойствами. Материалы на основе стекла также широко распространены, при этом хотелось бы отметить применение их в высококачественной оптике, где необходимые свойства достигаются не только за счет точной обработки, но и легирования различными веществами.

Разнообразие синтетических диэлектрических материалов и широта их применения

настолько велики, что их невозможно не только полностью охватить, но даже предугадать пути развития этой области науки и техники. Это и конструкционные материалы (все большее распространение приобретает 3D-принтинг), и электроизоляционные материалы, и электроустановочные изделия, электронакопительные устройства. Ставятся и реализуются задачи получения материалов с заданными свойствами.

Как известно, электрическое поле проникает внутрь диэлектрика и изменяется в соответствии с его свойствами, обусловленными явлениями поляризации и деполяризации. При этом могут присутствовать различные механизмы поляризации с количественными характеристиками, различающимися на порядки. Совокупность механизмов поляризации характеризуется значением диэлектрической проницаемости ϵ .

Выявление наличия различных механизмов поляризации и определение их количественных характеристик (например, соответствующих вре-

мен релаксации) возможно лишь при динамическом электрофизическом воздействии на исследуемый образец. При этом определяется комплексная диэлектрическая проницаемость ε^* . Именно мнимая часть ε^* содержит информацию о структуре механизмов поляризации и, как следствие, о структуре исследуемого образца.

Динамическое электрофизическое воздействие может быть реализовано двумя способами: подачей на исследуемый образец гармонического сигнала с изменяющейся в широком диапазоне частотой или подачей ступенчатого сигнала [1]. Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки. В первом случае качество гармонического сигнала может быть очень высоким и сразу получается спектр диэлектрической проницаемости. Однако получить спектр в широком диапазоне частот, да еще и при соблюдении требования непрерывного изменения частоты практически невозможно, так что этот способ может быть использован исключительно при диагностических исследованиях. Указанные недостатки и время, затрачиваемое на операции, делают этот способ совершенно не совместимым с потребностями современного производства, когда параметры изделий приходится измерять быстро и часто. Особенностью второго способа является предположение о непрерывном спектре в ступенчатом воздействии, что, собственно, делает его универсальным и упрощает измерительное устройство, но, во-первых, достигнуть идеальной ступеньки невозможно (никакой процесс не происходит мгновенно), а во-вторых, значительно усложняется обработка получаемой информации.

Необходимо отметить, что могут потребоваться исследования как собственно вещества материала, так и готового изделия (или полуфабриката на определенном этапе технологического процесса), когда образец заполняет пространство между металлическими обкладками измерительного конденсатора не полностью, например при сложной форме изделия. С учетом проникновения электрического поля в диэлектрик информационный сигнал в последнем случае будет представлять собой суперпозицию отклика диэлектрического материала и пустых областей измерительного конденсатора. Для того чтобы упростить обработку информации, по-видимому, эффективно будет регистрировать дифференциальный сигнал от совокупности измерительного конденсатора и идентичного геометрически ему конденсатора, но пустого.

Обычно измерительная информация представлена сигналами напряжения (или тока), которые для получения спектра диэлектрической проницаемости надо подвергнуть фурье-преобразованию [2].

Впервые устройство, реализующее способ ступенчатого воздействия, было описано в [1]. Однако оно обладало относительно низкой точностью, малым быстродействием и сложной схемой, так как не учитывался цифровой характер регистрации и обработки получаемой информации. Когда используются цифровые сигналы, то они кодируются определенным числом цифровых разрядов, что практически задает число возможных значений сигнала. Кроме того, информационный сигнал $U(t)$ после подачи ступенчатого является монотонным. Тогда вместо регистрации двух величин $U(t)$ и t можно регистрировать только моменты времени достижения сигналом $U(t)$ каждого из возможных значений, задаваемых схемой кодирования, – эффективность системы регистрации значительно улучшается, возрастают быстродействие и точность, объем передаваемой информации сокращается.

Устройство для выполнения такого рода исследований было предложено в [3]. Оно отличалось простотой, так как в его составе использовались стандартные измерительные блоки. Однако регистрация момента достижения информационным сигналом каждого из возможных значений являлась по существу отдельным изолированным измерением. Это действительно необходимо, когда скорость изменения регистрируемого сигнала превышает быстродействие измерительной схемы и скорость компьютерной регистрации. Но форма информационного сигнала как отклика на ступенчатое воздействие такова, что на конечном участке скорость его изменения мала. А ведь именно измерения на конечном пологом участке $U(t)$ необходимы для выявления механизмов поляризации с большими временами релаксации (в низкочастотной области спектра ε^*), что особенно важно для исследования и контроля изделий из композитных материалов и где метод импульсной поляризации имеет особые преимущества [1]. Здесь время достижения следующего возможного уровня напряжения может достигать десятков минут (а то и часов). Таким образом, можно сделать вывод, что алгоритм работы рассматриваемого метода неэффективен.

Система диэлектрической спектрометрии. Структура компьютерной системы диэлектromетра представлена на рис. 1. Генератор ступеньки

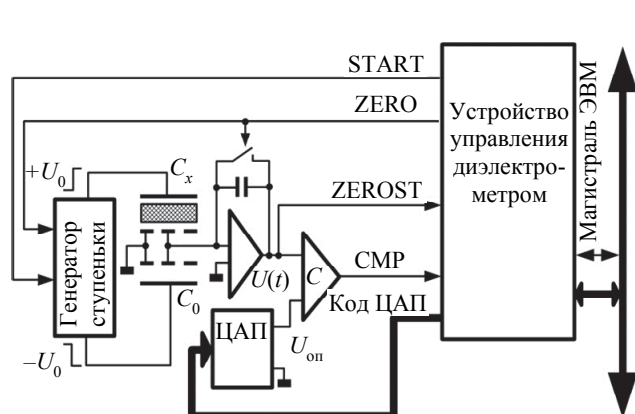


Рис. 1

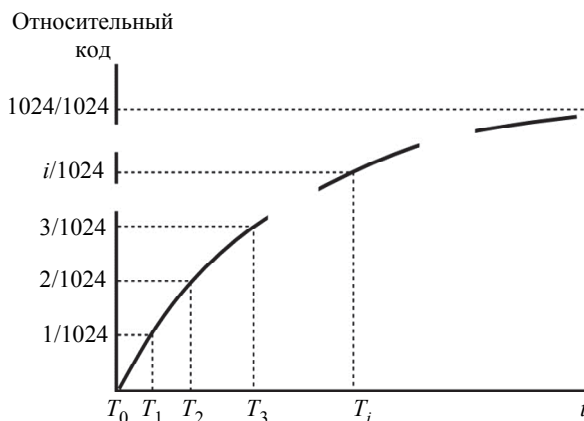


Рис. 2

напряжения подает на измерительный конденсатор $C_x - C_0$ сигнал с амплитудой U_0 . Вакуумные емкости конденсаторов C_x и C_0 идентичны, но в конденсатор C_x помещается исследуемый образец.

По выходному сигналу $U(t)$, пропорциональному $q_x(t)$, вычисляется комплексный коэффициент передачи исследуемой цепи:

$$K(\omega) = \frac{i\omega}{U_0} \int_0^{\infty} U(t) \exp(-i\omega t) dt,$$

а комплексная диэлектрическая проницаемость исследуемого образца:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_0 [K^{-1}(\omega) - 1],$$

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость эталона. Результат обработки измерительной информации должен удовлетворять требованиям удобства для анализа и восприятия исследователем, что достигается с помощью соответствующих средств отображения.

Основной проблемой измерения является достижение высокой точности при высокой скорости нарастания входного сигнала $U(t)$. Она решается за счет использования цифроаналогового преобразователя ЦАП и компаратора C (рис. 1) ввиду цифрового способа регистрации и обработки информации. Компаратор выдает сигнал CMP в момент совпадения сигнала $U(t)$ и опорного напряжения $U_{оп}$ с выхода ЦАП. Необходим также таймер предназначенный для фиксации времени от подачи ступеньки напряжения на измерительный конденсатор $C_x - C_0$ до момента срабатывания компаратора.

Устройство управления диэлектрометром (рис. 1) обеспечивает обмен управляющими и информационными сигналами между диэлектро-

метром и компьютером. Драйвер устройства обеспечивает программную связь с системными средствами компьютера. В состав устройства управления входят высокочастотный генератор; 16-разрядный таймер-счетчик, буферный регистр таймера-счетчика; регистр управления и состояний; схема фиксации таймера; регистр данных ЦАП; мультиплексор данных; схема сопряжения с магистралью; схема прерываний.

Таймер-счетчик обеспечивает измерение интервала времени от момента подачи возбуждающего сигнала U_0 до момента совпадения сигнала $U_{оп}$ и сигнала $U(t)$.

Связь устройства управления с измерительной схемой диэлектрометра осуществляется посредством следующих сигналов (рис. 1): START — сигнал запуска генератора ступеньки; ZERO — сигнал приведения диэлектрометра в начальное состояние; ZERO ST — сигнал контроля начального состояния диэлектрометра; CMP — сигнал совпадения сигналов $U_{оп}$ и $U(t)$; сигналы 12-разрядного цифрового кода данных ЦАП.

По регистрируемому информационному сигналу определяются мнимая и действительная части комплексной диэлектрической проницаемости. Периодически обновляемый (по мере поступления и обработки данных) результат отображается на экране дисплея. С течением времени измерения точность результата и его достоверность возрастают.

Разрешение системы для времени релаксации составляет 10^{-7} с.

Используется цифровой метод регистрации $U(t)$, которое может принимать значение одного из 2^m уровней (где m — разрядность ЦАП). Вследствие того, что $U(t)$ как отклик на ступеньку напряжения (рис. 2) монотонно возрастает, реги-

стрируется время достижения этим сигналом каждого из 2^m уровней.

Диэлектрический спектрометр работает в двух режимах в зависимости от скорости нарастания сигнала $U(t)$. Последовательность действий алгоритма работы следующая:

1) установка начального уровня опорного напряжения $U_{оп} = U_{оп1}$;

2) включение генератора ступеньки и запуск таймера;

3) ожидание сигнала СМР; по приходу СМР происходит фиксация состояния таймера (таймер продолжает работать) и ввод этого состояния в оперативную память компьютера;

4) наращивание опорного напряжения: $U_{оп} = U_{оп} + \Delta U_{оп}$ ($\Delta U_{оп} = U_{оп} ЦАП / 2^m$, где m – разрядность ЦАП; $U_{оп} ЦАП$ – его опорное напряжение; при $m = 12$ и $U_{оп} ЦАП = 10$ В $\Delta U_{оп} = 2.44$ мВ);

5) проверка сигнала СМР. Если он равен 1 ($U(t) > U_{оп}$), то скорость нарастания $U(t)$ слишком высока – переход к п. 6, иначе ($U(t) < U_{оп}$) – переход к п. 3;

6) выключение генератора ступеньки, включение цепи разряда измерительного конденсатора C_x , обнуление счетчика-таймера и запрет счета;

7) контроль перехода измерительной схемы в исходное состояние;

8) подтверждение значения опорного напряжения $U_{оп}$, на котором произошел последний сбой;

9) переход к п. 2.

Полученные данные представлены в памяти компьютера набором времен T_n (где T_n – время, прошедшее с момента запуска генератора ступеньки до момента совпадения сигнала отклика с n -м значением $U_{оп}$).

Скорость изменения сигнала $U(t)$ со временем падает. Сначала она превышает скорость регистрации системы, и для каждого измерения происходит сброс измерительной схемы (пп. 6–9) – каждое измерение является отдельным действием. Когда скорость изменения $U(t)$ начинает соответствовать скорости регистрации, то операции сброса измерительной схемы и подачи новой ступеньки напряжения можно исключить – измерения для последующих уровней происходят в течение одной ступеньки напряжения по ветви ал-

горитма, заданной пп. 3–5. В данной системе реализовано автоматическое переключение режимов работы описанного ранее алгоритма регистрации информации.

Компьютерная система диэлектromетра может быть подключена как к универсальной ЭВМ, так и к специализированному микроконтроллеру, что обеспечивает ее применение в научных исследованиях, в промышленности и в виде переносных систем. Подробное описание специализированных систем дано в [4]. Создана универсальная система диэлектрического спектрометра, подключаемого к компьютеру по стандартной последовательной линии.

Метод обработки диэлектрической информации. Основа метода измерения и предварительной обработки электрофизического отклика диэлектрического образца на ступеньку напряжения с единичной амплитудой заключается в следующем.

Для конденсатора с единичной вакуумной емкостью, заполненного диэлектриком, комплексная диэлектрическая проницаемость определяется следующим фурье-преобразованием:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = \int_0^{\infty} J(t) \exp(-i\omega t) dt,$$

где $J(t)$ – сила тока отклика на единичную ступеньку напряжения; $\varepsilon'(\omega)$ и $\varepsilon''(\omega)$ – соответственно действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости, причем $\varepsilon_0 = \varepsilon^*|_{\omega=0}$, $\varepsilon_{\infty} = \varepsilon^*|_{\omega \rightarrow \infty}$.

С целью повышения скорости и эффективности обработки диэлектрических измерений авторами предложен оригинальный метод вычисления действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости, который может быть использован в компактном вычислительном устройстве, встроенном, например, в систему управления технологическим процессом [4]. Основой метода являются квадратурные формулы для вычисления интеграла.

Действительная и мнимая части фурье-преобразования определяются для n значений частоты, расположенных в геометрической прогрессии. При этом максимальная частота ω_1 задается, а минимальная частота $\omega_n = \omega_1 / \Delta^{n-1}$, где $\Delta > 1$. В этих точках действительная (Re) и мнимая (Im) части диэлектрической проницаемости аппроксимируются суммами:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\omega_i) &= \frac{1}{\omega_i} \left[(\Delta - 1)b_{1-i}j_0 + \Delta(b_{2-i} - b_{1-i})j_1 + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=2}^r ((b_{k-i-1} - b_{k-i}) + \Delta(b_{k-i+1} - b_{k-i})j_k) \right]; \\ \operatorname{Im}(\omega_i) &= \frac{1}{\omega_i} \left[(1 + (\Delta - 1)a_{1-i})j_0 + \Delta(a_{2-i} - a_{1-i})j_1 + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=2}^r ((a_{k-i-1} - a_{k-i}) + \Delta(a_{k-i+1} - a_{k-i}))j_k \right], \end{aligned}$$

где r равно числу уже вычисленных j_k и связано со скоростью нарастания $U(t)$. При регистрации нового T_i вычисляется новый j_k , соответствующий более позднему моменту времени. При поступлении T_i , позволяющего определить новое j_k , r увеличивается, суммы пересчитываются и отображаются новые зависимости действительной и мнимой части. Ток j_k соответствует моменту времени t_k , где $t_0 = 0, t_1 = 1/\omega_1, t_2 = t_1\Delta, \dots, t_n = t_1\Delta^{n-1}$. Среди поступающих временных отсчетов отыскиваются те, для которых выполняется неравенство $T_i \leq t_k < T_{i+1}$, и затем $j_k = j(t_k)$ вычисляются как

$$j_k = J_i + (t_k - T_i) \frac{J_{i+1} - J_i}{T_{i+1} - T_i},$$

где J_i – ток, определяемый U_i , напряжением, достигаемым $U(t)$ за время T_i ; $k_{\max}$ вычисляется из условия $T_{k_{\max}} \leq 10^4$ с. Коэффициенты

$$a_s = \frac{1}{\Delta - 1} \left(1 - \frac{\sin \Delta^s}{\Delta^s} \right), b_s = \frac{1}{\Delta - 1} \frac{1 - \cos \Delta^s}{\Delta^s},$$

где $s = 1 - n, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, k_{\max}$.

Расчет значений a_s, b_s и Δ позволяет использовать только простейшие операции (сложение, вычитание, умножение) и тем самым повысить эффективность процесса обработки, а также упростить обрабатываемое устройство, предварительно записав a_s, b_s и Δ в его память.

Итерационный метод вычисления действительной и мнимой части ϵ^* обеспечивает обработку в реальном масштабе времени. Можно прервать обработку при получении требуемых результатов. Точность спектров возрастает при поступлении очередного T_i , и в своей высокочастотной части

они постепенно становятся неизменными. Следовательно, если достигнута требуемая частота, то нет необходимости продолжать исследование.

Программное обеспечение обработки диэлектрической информации включает 2 модуля. Первый модуль служит для управления диэлектрометром, обработки получаемых данных и вывода результатов. Второй модуль обеспечивает расчет данных для первого.

Первый модуль – DSM – содержит драйвер диэлектрометра, средства математической обработки информации и интерфейс с оператором. Драйвер устройства представляет собой программный подмодуль, работающий с диэлектрометром на физическом уровне и выполняющий обработку прерываний от устройства. Функции драйвера:

а) подготовка и запуск устройства для считывания диэлектрической информации на воздействие ступеньки напряжения;

б) обработка переполнения 16-разрядного счетчика-таймера и наращивания на единицу старшей части таймера, хранящейся в двух последовательных ячейках оперативной памяти;

в) обработка совпадения опорного напряжения ЦАП и информационного сигнала диэлектрометра – запоминание показания таймера для текущего опорного напряжения ЦАП;

г) обработка ошибочной ситуации, когда скорость нарастания сигнала-отклика диэлектрометра не адекватна быстройдействию системы – начальная установка устройства и новая подача воздействия-ступеньки с последующим ожиданием совпадения информационного сигнала с текущим опорным напряжением ЦАП;

д) начальная установка устройства.

На измерительный конденсатор с исследуемым образцом подается сигнал в виде ступеньки напряжения. Информационный сигнал выглядит примерно так, как показано на рис. 2. Интервал его изменения делится на $2^m / \text{STEP}$ одинаковых отрезков. Измеряются времена $T_1, T_2, \dots, T_n$, за которые информационный сигнал достигает соответствующих уровней. Эти времена и являются входными данными для алгоритма компьютерной обработки. На рис. 2 STEP (шаг для 12-разрядного ЦАП) выбран равным 4 и число уровней равно 1024.

Действительная и мнимая часть ϵ^* вычисляются для n значений частоты, расположенных по геометрической прогрессии. Начальное и конечное значения этой прогрессии, число значений в ней, а также шаг для ЦАП задаются оператором с помощью модуля формирования коэффициентов и параметров DSCOEF, исходными данными для которого являются: 1) минимальная частота; 2) максимальная частота; 3) число частот; 4) шаг ЦАП. Первые 3 определяют, в каких точках будет вычисляться фурье-преобразование. Формируются 3 файла: PARAMM.DAT, AS.DAT, BS.DAT. В первый файл записываются 6 чисел: 1) число частот n , для которых определяется фурье-преобразование; 2) максимальное число слагаемых в сумме, аппроксимирующей фурье-образ; 3) $\omega_{\max}$; 4) Δ , где $\omega_{\min} \Delta^{n-1} = \omega_{\max}$; 5) частота таймера диэлектromетра в герцах; 6) шаг для ЦАП. Коэффициенты a_s, b_s ($1 - n \leq s \leq k_{\max}$) вычисляются модулем DSCOEF и записываются в файлы AS.DAT и BS.DAT соответственно.

Модуль DSM выполняет рабочие циклы до получения и обработки n измерений, в каждом из которых проверяет наличие запроса от оператора и поступление новых данных от аппаратуры. Операции цикла следующие:

1) проверка наличия команды оператора: если есть, то она выполняется;

2) проверка поступления новых данных от диэлектromетра: если поступили, то они считываются, вычисляется новое значение j_k , модифицируется сумма Фурье и обновляются отображаемые зависимости.

Работа может быть прервана соответствующей командой, при этом возможно сохранение накопленных к этому моменту данных.

Данные сохраняются в файле с заданным именем и расширением DAT.

На экран монитора компьютера или специализированного видеомонитора выводятся нормированные графики $\epsilon'(\omega)$ и $\epsilon''(\omega)$ (рис. 3). Здесь представлены изображения, полученные с экрана видеоконтрольного устройства, — зависимости $\epsilon(\omega)$ для пленок SiO и SiO₂ при различных режимах термообработки: *a* — SiO при 150 °C; *б* — SiO при 450 °C; *в* — SiO₂ при 850 °C; *г* — SiO₂ при 1200 °C.

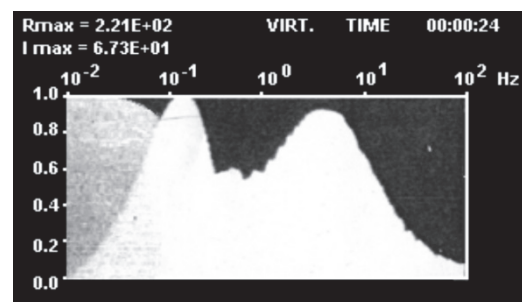
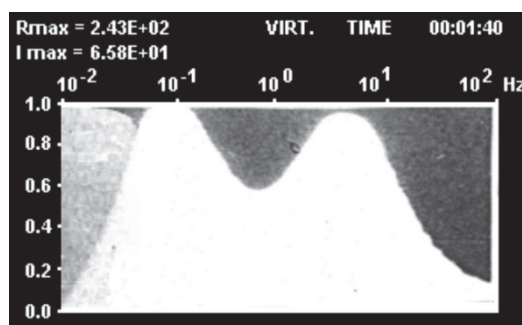
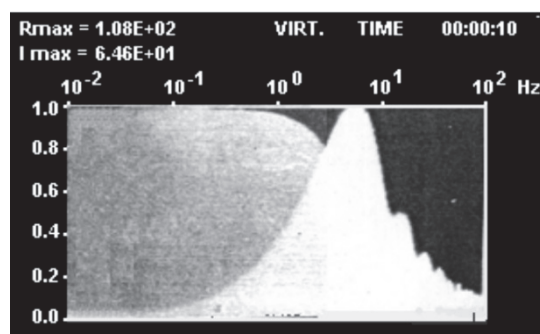
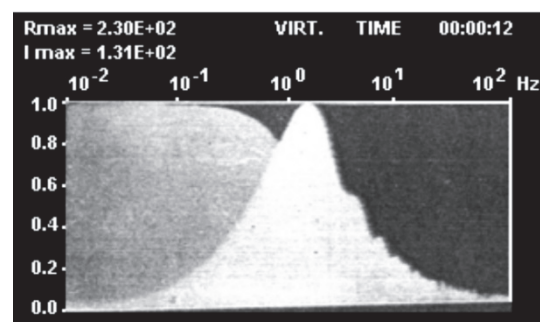
*a**б**в**г*

Рис. 3

Система исследования диэлектрических материалов, разработанная с помощью широкополосной диэлектрической спектromетрии, является компактной, экономичной системой, работающей в реальном масштабе времени.

Из вышеизложенной работы диэлектromетра следует, что для обработки и интерпретации результатов измерений требуется достаточно сложное математическое и программное обеспечение. Отсутствие строгих теоретических описаний рас-

смаатриваемого явления требует частых изменений методов обработки, что наиболее эффективно можно реализовать в компьютерной системе. Значительное достижение состоит в реализации управления процессом и обработки диэлектрической информации в реальном масштабе времени. Компьютер используется как для задач управления, так и для решения вычислительных задач. Функция управления в этом случае реализуется как автоматически, так и с помощью диалоговой системы реального времени.

Разработаны и реализованы средства регистрации и обработки диэлектрометрической информации. Принципы, заложенные в работу устройства регистрации (диэлектрометра), с одной стороны, облегчают процесс собственно регистрации и расширяют его возможности, особенно в низкочастотной области, а с другой – переносят основную нагрузку на математическую (компьютерную) обработку.

Из-за отсутствия исчерпывающих теоретических представлений о явлениях в диэлектриках и ввиду непрерывного появления все новых мате-

риалов оказался необходимым интерактивный режим работы. Это в первую очередь касается обработки результатов исследований наиболее практически ценных синтетических композитов. Здесь большую и существенную роль играют информативные способы отображения данных, обеспечивающие оперативное принятие решения как исследователем, так и оператором. Необходимо отметить предложенный метод и компьютерный алгоритм вычисления комплексной диэлектрической проницаемости ϵ^* в реальном масштабе времени. Он эффективно может быть использован в технологических системах.

Получаемые данные обработки позволяют легко выявить, например, отличия характеристик исследуемого образца от характеристик работоспособного эталонного изделия, что представляет собой, несомненно, шаг вперед для разработки как собственно новых материалов, так и технологий их производства и изделий на их основе, поскольку появляется возможность объективного контроля и пооперационной диагностики в технологических процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hyde P. J. Wide-frequency-range dielectric spectrometer // Proc. IEE. 1970. Vol. 117, № 9. P. 1891–1901.
2. Macdonald J. R., Brachman M. K. // Rev. Mod. Phys. 1956. Vol. 28. P. 393–422.
3. Киселев В. И., Султанов Р. М., Усольцев М. В. Устройство для определения электрических параметров диэлектриков // ПТЭ. 1990. № 4. С. 136.

4. Карпов А. Г., Клемешев В. А. Методика определения оптических констант и толщины тонкой пленки // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2017. Т. 13, № 1. С. 17–26.

N. V. Egorov, A. G. Karpov
Saint Petersburg State University

V. V. Yanovskiy
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

SYSTEM FOR RESEARCH OF DIELECTRIC MATERIALS BY BROADBAND DIELECTRIC SPECTROMETRY

Presents hardware and software for the investigation of dielectric materials using broadband dielectric spectrometry. The technical principles of the operation of the equipment are as follows: impact on the sample under investigation is carried out by means of a «stepped» electric field to provide broadband spectrometry; taking into account the digital nature of the information recording, it is possible to replace the measurement of the analogue signal of the dielectric sample response by recording the times when the signal reaches levels corresponding to the digital codes; automatic maintenance of adequacy between the increasing rate of the dielectric sample response and the speed of the computer registration system. The presented mathematical and software support allows realizing the acquisition and visualization of complex dielectric permittivity in real time. The method and structure of the software allows realizing it in a compact computer system suitable for use in technological processes and onboard systems.

Dielectric materials, broadband dielectric spectrometry, dielectrometer, complex dielectric permittivity, Fourier transform using quadrature formulas