

УДК 621.396

Н. М. Олиферович, ассистент (БГТУ);
Д. А. Гринюк, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);
И. О. Оробей, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВПИТЫВАНИЯ

В статье рассматриваются результаты анализа динамических свойств первичного преобразователя для определения параметров впитывания. При проведении экспериментальных исследований был выполнен ряд опытов по изучению свойств емкостного преобразователя, параметры которого определялись динамикой пропитки фильтровальной бумаги на различных частотах. На основе полученных данных определены зависимости параметров схемы замещения измерительной ячейки от частоты. Установлено, что активная составляющая схемы замещения преобразователя изменяется в широком диапазоне и может осложнять работу классических схем по измерению емкости. Результаты исследования позволяют выбрать схему измерительной цепи параметров преобразователя. Определен оптимальный частотный диапазон работы измерительных преобразователей. Проведен анализ динамических погрешностей измерительных схем.

In the article the results of the analysis of the dynamic properties of sensing device for determine of characteristic of capillary soaking are considered. In carrying out experimental studies a series of experiments was carried out to study the properties of the capacitance transducer. Parameters components of the capacitance transducer determine the dynamics of the soaking of filter paper at different frequencies. Based on these findings have been identified dependencies of the parameters of the equivalent circuit of the measuring cell from the frequency. It has been found that the active component of the equivalent circuit of transducer varies over a wide range and can complicate the conversion of the classical schemes for measuring capacitance. The results of this study allow to select the diagram of measuring circuits of transducer. The optimal frequency range for measuring circuits is identified. Analysed the dynamic errors of measuring circuits.

Введение. Существует ряд приборов, работа которых основана на преобразовании изменения физических величин в изменение емкости: емкостные уровнемеры и манометры, преобразователи влажности и т. д. [1–3].

Измерительные схемы преобразователей могут быть построены на различных принципах, однако наибольшее распространение получили приборы на основе преобразования емкости в частоту (время) за счет мультивибраторов [4] или резонансных контуров [1–2, 5]. Данные подходы к построению измерительных схем в той или иной степени чувствительны к паразитной активной составляющей преобразователей. Учесть паразитные составляющие в емкостном преобразователе можно путем использования схем определения полного сопротивления, но такие приборы значительно сложнее в изготовлении и требуют использования микропроцессорных элементов.

Основная часть. Проведенные эксперименты по изучению динамики пропитки фильтровальной бумаги на базе прибора Е7-12 для различных жидкостей показали (таблица) [5], что диапазон изменения параметров схемы замещения (рис. 1, а) измерительного преобразователя достаточно широк. Прибор Е7-12 проводит измерения на частоте 1 МГц. Для оценки динамических свойств на других частотах по-

следовательно с измерительным конденсатором (первичный преобразователь Z_C) включали добавочный резистор R (рис. 1, б). Схему подключали к генератору с переменной частотой, вырабатывающему напряжение U .

Диапазон изменения параметров схемы замещения измерительной ячейки

Среда	Диапазоны сопротивлений, Ом	Диапазоны емкостей, нФ
Вода	163–12 500	0,502–4,73
Вода (замкнутая)	210–5 560	0,575–3,78
Суспензия глины	161–4 170	0,501–4,26
Масло	7140–11 100	0,501–1,46

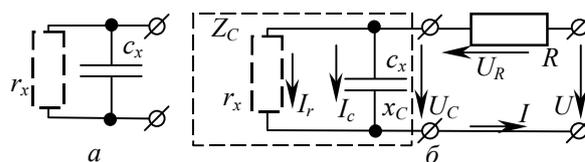


Рис. 1. Схема замещения измерительной ячейки (а) и измерительная схема эксперимента определения частотных характеристик (б)

В процессе измерения на различных частотах контролировали напряжения U_C , U_R и U , после чего производили перерасчет параметров

схемы замещения (рис. 2). Для повышения точности R в процессе измерения подбирались так, чтобы углы α , φ и их сумма была больше 10° , но меньше 80° . Напряжение в измерительной цепи было примерно 10 В, частота изменялась в диапазоне от 10 Гц до 1 МГц.

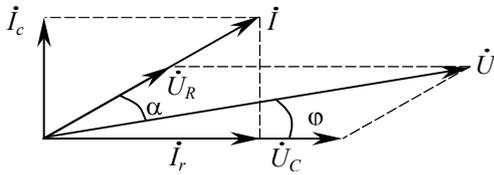


Рис. 2. Векторная диаграмма измерительной схемы

Измерения проводились на сухой и смоченной бумаге, которая получалась добавлением порций по 6 мл с выдержкой времени после полного впитывания. Первичный преобразователь подключался к генератору синусоидальных колебаний, после чего проводились измерения на контрольных частотах. В начале и конце измерения прибором Е7-12 контролировались параметры схемы замещения. Результаты усреднялись по трем сериям измерений.

Результаты эксперимента. Зависимости параметров схемы замещения от частоты представлены на графиках (рис. 3–7).

При проведении измерений контрольные данные с Е7-12 показали, что, несмотря на небольшую продолжительность (не более 6–8 мин) снятия параметров схемы, в бумаге проходят процессы, которые могут изменить параметры схемы замещения до 8%.

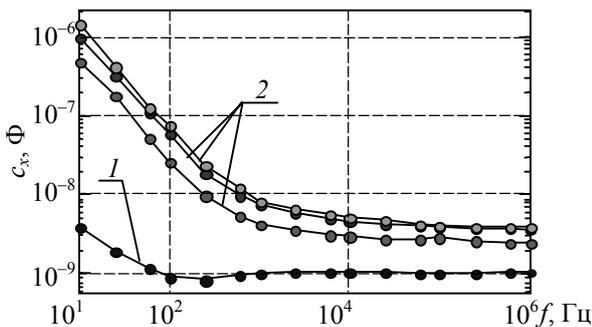


Рис. 3. Зависимость емкости c_x от частоты f для сухой (1) и смоченной (2) бумаги

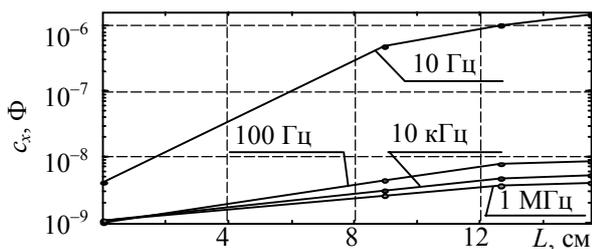


Рис. 4. Зависимость c_x от радиуса L пропитки при различных частотах

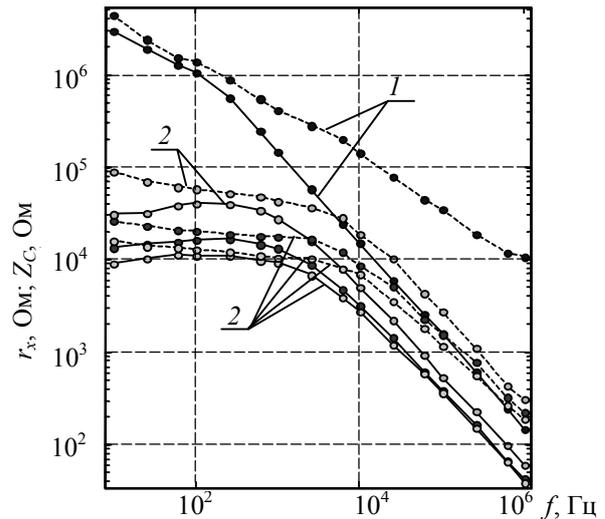


Рис. 5. Зависимость r_x (---) и Z_C (—) от частоты для сухой (1) и смоченной (2) бумаги

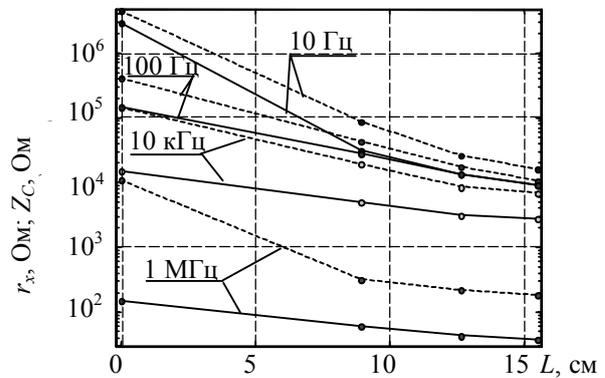


Рис. 6. Зависимость r_x (---) и Z_C (—) от радиуса L пропитки при различных частотах

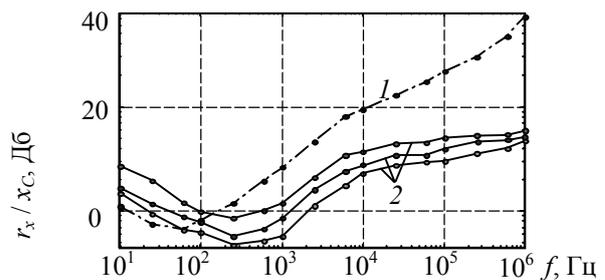


Рис. 7. Зависимость отношения r_x к x_C от частоты для сухой (1) и смоченной (2) бумаги

Сопrotивления r_x и Z_C не могут напрямую использоваться для определения динамики пропитки с помощью резонансной схемы или схемы с мультивибратором, поскольку данные параметры существенно зависят от частоты во всем диапазоне проведенных исследований. По результатам экспериментов кривые зависимости радиуса пропитки от емкости имеют более линейный характер (рис. 4), что указывает на предпочтительное их использование для построения преобразователя измерителя емкости.

Использование c_x для идентификации динамики пропитки может быть положено в основу любого из рассмотренных принципов построения преобразователей. Начиная с 2,5 кГц зависимость емкости от частоты минимальна. Кроме того, увеличивается отношение между сопротивлениями r_x и x_C (рис. 7), уменьшается влияние r_x на точность измерения. Однако сдвиг рабочего диапазона преобразователей в сторону увеличения частоты будет приводить к увеличению измерительных токов, поскольку r_x быстро снижается и уже на частоте 100 кГц становится меньше 1 кОм.

Динамические погрешности измерительных схем. Измерительная схема на 555-м таймере не может быть использована напрямую, так как резкое снижение активного сопротивления r_x после начала впитывания исказит результаты преобразования емкости в частоту колебаний. Дополнительная емкость C , включенная параллельно измерительной ячейке или последовательно с ней (рис. 8), и снижение сопротивления обратной связи R могут расширить диапазон преобразования, но результаты измерений будут получаться с серьезными погрешностями.

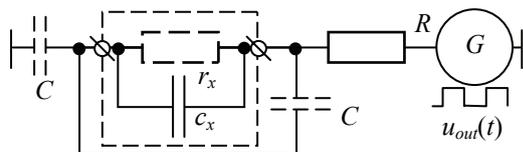


Рис. 8. Схема преобразования c_x во временные параметры

Данный принцип можно реализовать на операционных усилителях, которые имеют меньше ограничений. Изменение напряжения, подведенного к цепи заряда – разряда, и (или) напряжений срабатывания компараторов в зависимости от текущего значения сопротивления r_x может позволить решить задачу устойчивого преобразования c_x во время.

Еще одной проблемой является наличие динамических погрешностей в начале пропитки.

Проявление динамической погрешности оказывает максимальное влияние на начальной стадии пропитки. В простейшем случае функции изменения емкости и сопротивления между моментами измерения можно считать линейными с коэффициентами усиления:

$$c_{i+1} = c_i(1 + k_C t); r_{i+1} = r_i(1 - k_R t), \quad (1)$$

где c_i, c_{i+1} – значения емкости при i -м и $(i + 1)$ -м измерениях; r_i, r_{i+1} – значения сопротивления при i -м и $(i + 1)$ -м измерениях; k_C, k_R – линейные коэффициенты усиления емкости и сопротивления соответственно (их величину в процессе

измерения можно определять по результатам предыдущих измерений).

В общем случае уравнение для заряда последовательно соединенного резистора R и измерительного конденсатора можно записать в виде

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{u_C(Rc_i)^{-1} \left(\frac{Rr_i^{-1}}{1 - k_R t} + 1 \right)}{1 + k_C t} = \frac{U(Rc_i)^{-1}}{1 + k_C t}. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) напрямую затруднительно. Однако можно принять, что на начальном этапе $R \ll r_i$, и (2) преобразуется к виду

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{Rc_i(1 + k_C t)} = \frac{U}{Rc_i(1 + k_C t)}. \quad (3)$$

Учесть влияние изменения активной части сопротивления можно путем уменьшения напряжения U , которое можно найти через делитель напряжения R и r_i .

Решив уравнение (3) при условии $t = 0$ и $u_C = 0$, можно получить выражение для расчета динамики заряда емкости:

$$u_C(t) = U \left(1 - (1 + k_C t)^{\frac{-1}{Rc_i k_C}} \right). \quad (4)$$

При условии переключений по уровням от 1/3 до 2/3 от приложенного напряжения для определения времени заряда получаем формулу

$$\Delta t = 3 \frac{1}{Rc_i k_C} k_C^{-1} - 1,5 \frac{1}{Rc_i k_C} k_C^{-1}. \quad (5)$$

При использовании гармонического воздействия возможно формирование сигнала как от источника тока, так и от источника напряжения. Часто можно встретить поочередное формирование разных типов воздействий, а затем обработку результатов с помощью преобразований Фурье. Значительное изменение емкости преобразователя за период сигнала приведет к появлению более высоких гармоник. При воздействии источника напряжения ток на выходе описывается выражением

$$i_C = U \left(\omega c_i(1 + k_C t) \cos(\omega t) + \frac{\sin(\omega t)}{r_i(1 - k_R t)} \right),$$

которое получено из тех же допущений, что и при использовании режима заряда – разряда.

Разложение в ряд Фурье с использованием значений из экспериментов для сухой бумаги на частоте 100 Гц, а также при уменьшении и увеличении r_x на 25% позволяет получить следующие зависимости относительной погрешности γ от влияния искажения формы сигнала на определение r_x и x_C без учета изменения ис-

комых параметров за период гармонического воздействия по отношению к $c_i(r_i)$ и $c_{i+1}(r_{i+1})$ (рис. 9). При построении кривых скорости изменения емкости и сопротивления принимались одинаковыми $k_C = k_R = k$.

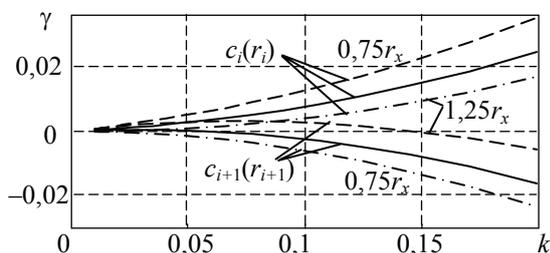


Рис. 9. Зависимость погрешности γ от скорости изменения k при разных соотношении между r_x и x_C

Произведена оценка влияния искажения формы кривой заряда от изменения во времени параметров r_x и x_C при определении емкости по времени между уровнями 2/3 и 1/3 от приложенного напряжения (рис. 10, 11). Значения r_x и x_C корректировали в зависимости от времени заряда Δt в соответствии с экспериментальными данными. Графики получались при изменении сопротивления R , уменьшении и увеличении r_x на 25%.

Выводы. Проведенные исследования показывают, что контроль емкости с целью определения координаты пропитки является наилучшим решением. Активное сопротивление измерительного конденсатора может вносить существенные погрешности в процесс измерения. Лучшими точностными характеристиками будут обладать схемы на гармонических сигналах с постоянной частотой. Схемы преобразования емкости во временные параметры сигнала не должны снижать частоту ниже 5 кГц, где у емкости может наблюдаться зависимость от частоты. Измерительные алгоритмы должны осуществлять проверку на скорость измерения параметров на начальной стадии пропитки и по необходимости вносить корректировку в получаемые результаты из-за искажений формы сигнала от линейной. Меткой времени полученного результата при любом измерительном принципе лучше выбирать окончание измерительного такта.

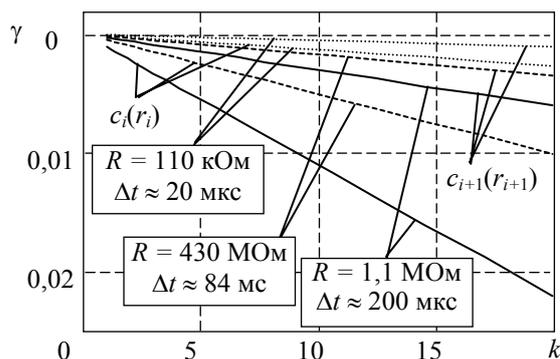


Рис. 10. Зависимость погрешности γ от скорости изменения k при варьировании сопротивления R

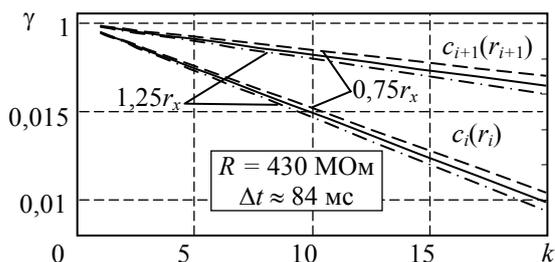


Рис. 11. Зависимость относительной погрешности γ от параметра k при разном соотношении между r_x и x_C

Литература

1. Шишмарев В. Ю. Средства измерений: учебник для студ. учреждений с проф. образованием. 4-е изд., стер. М.: Академия, 2010. 320 с.
2. Khandpur R. S. Handbook of Analytical Instruments. London: McGraw-Hill Professional, 2006. 770 p.
3. Гринюк Д. А., Оробей И. О., Богослав Н. М. Устройство непрерывного измерения процесса смачивания // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. 2011. Вып. XVIII. С. 108–112.
4. Vladimir Mitrovic. Pico С. // Elektor Electronics. 2011. № 4. P. 24–29.
5. Богослав Н. М., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Экспериментальное исследование динамики круговой пропитки // Труды БГТУ. 2013. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 99–103.

Поступила 01.03.2014