

А. С. АНИСИМОВ, А. С. ТОЛСТИКОВ

(Новосибирск)

**О ВЛИЯНИИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
НА ПАРАМЕТРЫ ЕМКОСТНЫХ ПЕРВИЧНЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

(Обзор)

Емкостные первичные измерительные преобразователи (ЕПП), получающие в измерительной технике широкое распространение, во время работы находятся под воздействием не только измеряемой величины, но и помех. Влияние помех на результаты измерения может быть настолько значительным, что может иногда поставить под сомнение принципиальную возможность использования того или иного ЕПП. Поэтому создание измерительной системы на базе ЕПП всегда связано с анализом его помехоустойчивости по отношению к наиболее характерным внешним возмущениям. С другой стороны, способность ЕПП воспринимать информацию о различных внешних воздействиях говорит о принципиальной возможности использовать его для измерения различных физических величин. Оба отмеченных факта непосредственно связаны с получением и исследованием строгих зависимостей, отражающих влияние различного типа внешних воздействий на параметры ЕПП.

К сожалению, в настоящее время материал по указанным вопросам не приведен в едином пособии, а разбросан по многочисленным литературным источникам в области физики диэлектриков, физики гетерогенных смесей и измерительной техники, что, несомненно, затрудняет возможность его использования при решении новых измерительных задач. В частности, с этим фактом встретились авторы при решении задач измерения нестационарных физических процессов посредством ЕПП в присутствии нестационарных параметрических помех в случае, когда частотные спектры измеряемого процесса и помех и полоса пропускания измерительной цепи с ЕПП совпадают.

Изложенное выше побудило авторов проанализировать основные соотношения, связывающие параметры ЕПП с внешними воздействиями, наиболее часто выступающими в процессе измерения в виде информативных или мешающих факторов.

1. Схемы замещения ЕПП. Чтобы осуществить процесс измерения, ЕПП помещают в некоторую измерительную цепь. Для детального анализа измерительных цепей, которому в литературе [1—5] уделяется значительное внимание, необходимо иметь полную эквивалентную схему замещения ЕПП с диэлектриком. Полная эквивалентная схема

ЕПП должна: отражать процессы, происходящие в ЕПП,—поляризацию и электропроводность диэлектрика; учитывать поверхностные и краевые эффекты и влияние паразитных параметров.

Если диэлектрик ЕПП достаточно сложен, естественно предположить, что в нем имеют место поляризации электронного, ядерного, ионного смещения, упруго-дипольная, дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная и структурная поляризации и электронная, ионная и

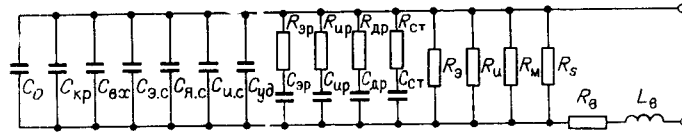


Рис. 1.

молионная электропроводности. В этом случае полная эквивалентная схема ЕПП с диэлектриком (рис. 1) может быть представлена в виде соединения ряда емкостей и сопротивлений. Поясним элементы этой схемы. C_0 — емкость ЕПП без диэлектрика в вакууме. Для плоской конструкции конденсатора (рис. 2, а), согласно [6—8], емкость определяется из выражения

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (1)$$

где $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ ф/м — диэлектрическая постоянная; $S = a \cdot b$ — площадь электродов в m^2 и d — расстояние между ними в м.

Для цилиндрической конструкции (см. рис. 2, б), согласно [6—8], имеет место равенство

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (2)$$

где l — высота цилиндров в м; r_1 и r_2 — радиусы внутреннего и внешнего цилиндров в м.

Емкость C_0 сферического конденсатора (см. рис. 2, в) определяется формулой [6]

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{2\pi D_1 D_2}{D_2 - D_1}, \quad (3)$$

где D_1 и D_2 — диаметры внутреннего и внешнего сферических электродов в м.

$C_{кр}$ — краевая емкость ЕПП, величина которой зависит от соотношения размеров электродов. Так, согласно [8], $C_{кр}$ плоского конден-

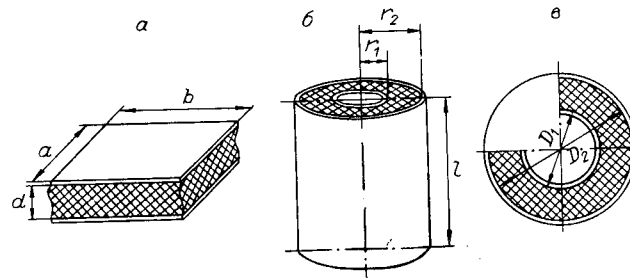


Рис. 2.

сатора (см. рис. 2, а) для соотношений $a/d > 3$ и $b/d > 3$ вычисляется по приближенной формуле

$$C_{кр} \approx \frac{\epsilon_0}{\pi} \left[\frac{b}{1 + \ln 2\pi \frac{a}{d}} + \frac{a}{1 + \ln 2\pi \frac{b}{d}} + \frac{d}{\pi \left(1 + \ln 2\pi \frac{a}{d}\right) \left(1 + \ln 2\pi \frac{b}{d}\right)} \right]. \quad (4)$$

Для соотношений $a/d > 10$ и $b/d > 10$ справедливо неравенство $C_{кр} < < 0,1 C_0$ [8].

$C_{вх}$ — паразитная емкость входных цепей измерительного устройства. Рациональным выбором элементов и конструкции измерительного устройства величина $C_{вх}$ может быть уменьшена до 2—5 пФ.

$C_{э.с.}$, $C_{я.с.}$, $C_{и.с.}$, $C_{уд.}$ — емкости, обусловленные поляризациями электронного, ядерного, ионного смещения и упруго-дипольной поляризации. Время установления перечисленных видов поляризации весьма мало (10^{-15} — 10^{-12} с), поэтому малы потери энергии на поляризацию и их можно опустить из рассмотрения.

$C_{эр.}$, $C_{ир.}$, $C_{др.}$, $C_{ст.}$ — емкости, обусловленные наличием электронно-релаксационной, ионно-релаксационной, дипольно-релаксационной и структурной поляризациями. Поскольку время установления релаксационных видов и структурной поляризации может быть велико, в полную эквивалентную схему замещения ЕПП введены активные сопротивления $R_{эр.}$, $R_{ир.}$, $R_{др.}$, $R_{ст.}$, учитывающие потери энергии при этих видах поляризации.

Наличие диэлектрика в ЕПП приводит к увеличению емкости C_0 в ϵ раз, т. е. $C_0 = \epsilon C_0$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика. В [6, 9—11] детально исследуется зависимость ϵ от вида поляризации, имеющей место в диэлектрике ЕПП, от температуры и давления диэлектрика. Результаты этих исследований в виде аналитических выражений приведены в табл. 1 (обозначения расшифровываются в примечании к табл. 2).

$R_э.$, $R_и.$, $R_м.$ — сопротивления электронному, ионному и молионному сквозным токам через диэлектрик. Объемное сопротивление сквозному току ЕПП плоской конструкции (см. рис. 2, а) с диэлектриком определяется по формуле

$$R_0 = \rho \frac{d}{S}, \quad (5)$$

где ρ — удельное объемное сопротивление диэлектрика. Для ЕПП цилиндрической конструкции (см. рис. 2, б) справедлива зависимость

$$R_0 = \rho \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi l}. \quad (6)$$

Наряду с ρ часто пользуются понятием удельной объемной электропроводности $\gamma = 1/\rho$. В [9, 10, 12] приводятся выражения, связывающие $\gamma(\rho)$ с видом электропроводности в диэлектрике, температурой и давлением диэлектрика. Результаты исследований этих работ сведены в табл. 2.

R_s — поверхностное сопротивление диэлектрика ЕПП, особенно существенное для смачиваемых диэлектриков при влажности больше 0,2. $R_в.$ и $L_в.$ — сопротивление и индуктивность выводов ЕПП. Влияние их сказывается лишь на высоких частотах.

Из рассмотренных элементов полной эквивалентной схемы замещения (см. рис. 1) только $C_{вх}$, $R_в.$ и $L_в.$ не изменяются под действием

Таблица 1

Виды диэлектриков	Неполярные диэлектрики ($\mu < 0.5$ дебая)	Полярные диэлектрики ($\mu > 0.5$ дебая)
Газообразные		По теории Клаузиуса—Мосотти (1, 2, 6) [9, 10], $\epsilon = \frac{1 + \frac{8}{3} \frac{\pi}{k} \frac{p}{T} \left(\alpha_3 + \frac{\mu^2}{3kT} \right)}{1 - \frac{4}{3} \frac{\pi}{k} \frac{p}{T} \left(\alpha_3 + \frac{\mu^2}{3kT} \right)}$
Жидкие	По теории Клаузиуса—Мосотти (1, 2) [9, 10], $\epsilon = \frac{1 + \frac{8}{3} \frac{\pi}{k} \alpha_3 \frac{p}{T}}{1 - \frac{4}{3} \frac{\pi}{k} \alpha_3 \frac{p}{T}}$	По теории Дебая (1, 2, 6) [9, 13, 14], $\epsilon = \frac{1 + \frac{8}{3} \pi n \left[\alpha_3 + \frac{\mu^2}{3kT} R(x) \right]}{1 - \frac{4}{3} \pi n \left[\alpha_3 + \frac{\mu^2}{3kT} R(x) \right]}$ По теории Онзагера (1, 2, 6) [9], $\epsilon = 2\pi n \frac{\mu^2 (v^2 + 2)}{9kT}$ По теории Кирквуда (1, 2, 6) [9], $\frac{(\epsilon - 1)(2\epsilon + 1)}{9\epsilon} = \frac{4}{3} \pi n \left(\alpha_3 + \frac{\mu^2}{3kT} q \right)$
Твердые		В настоящее время общая количественная теория поляризации аморфных полярных диэлектриков (1, 2, 4, 6) не создана.
		Для дипольных кристаллов (1, 2, 4, 6) общая теория поляризации не создана. Для ионных кристаллов (1, 3, 5), по теории Борна [9], $\epsilon = v^2 + 4\pi \frac{Q^2}{\omega^2} \frac{\kappa N^2}{M_1 M_2}$

Примечание. Цифрами в круглых скобках обозначены виды поляризации, имеющие место в диэлектрике: 1 — поляризация электронного смещения; 2 — поляризация ядерного смещения; 3 — поляризация ионного смещения; 4 — упруго-дипольная поляризация; 5 — ионно-релаксационная поляризация; 6 — дипольно-релаксационная поляризация.

Таблица 2

Виды диэлектриков	Газообразные диэлектрики	Жидкие и твердые диэлектрики
Диэлектрики с электронной, ионной и молионной проводимостями [12]	$\gamma = \frac{n_3 g^2}{2 \sqrt{\frac{6\pi m}{kT}} \rho D^2}$	$\gamma = \frac{n_3 g^2 \delta \Omega}{6kT} e^{-\frac{\varphi}{kT}}$

Примечание. В табл. 1, 2 приняты следующие обозначения: μ — дипольный момент молекулы; n — число молекул диэлектрика в единице объема; p — давление; T — абсолютная температура; $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град — постоянная Больцмана; α_3 — поляризуемость молекул, принимаемая одинаковой для всех молекул; $R(x)$ — редуцированный фактор; v — показатель преломления света диэлектриком; q — структурный фактор; Q — заряд иона; κ — плотность диэлектрика; ω — частота оптических колебаний; $N = 6,66 \cdot 10^{+23}$ — число Авогадро; M_1 и M_2 — атомные веса обоих диэлектриков; g — заряд носителя электричества; m — масса молекулы диэлектрика; D — ее диаметр; n_3 — концентрация носителей электричества; δ — расстояние между молекулами; Ω — частота тепловых колебаний; φ — энергия активации.

измеряемой физической величины и являются, таким образом, паразитными параметрами ЕПП. Очевидно, величина их должна быть возможно меньше.

Так как в сложных диэлектриках преобладающим является один из видов поляризации и проводимости, то именно он и определяет основные электрические свойства диэлектрика ЕПП, в силу чего полную эквивалентную схему замещения ЕПП можно существенно упростить. Если к тому же ограничиться диапазоном низких и средних частот измерения, то параметрами R_v и L_b можно пренебречь. При этом полная эквивалентная схема замещения ЕПП с диэлектриком может быть сведена к двум упрощенным эквивалентным схемам (рис. 3).

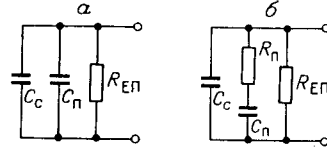


Рис. 3.

Схема рис. 3, а используется в том случае, если в диэлектрике ЕПП нет потерь энергии на поляризацию. В противном случае используется схема рис. 3, б. Здесь $C_c = C_0 + C_{кр} + C_{вх}$ — собственная емкость ЕПП без диэлектрика; C_p и R_p — емкость и сопротивление, характеризующие преобладающий вид поляризации и потери энергии, связанные с ним; $R_{ЕП}$ — сопротивление сквозному току через ЕПП.

В силу (2) емкость C_c определяется выражением

$$C_c = \epsilon_0 \frac{S}{d} + C_{кр} + C_{вх}; \quad (7)$$

тогда общая емкость ЕПП с диэлектриком для схемы рис. 3, а с учетом (4) представляется в виде

$$C_{ЕП} = \epsilon \epsilon_0 \frac{ab}{d} \left[1 + \frac{d}{\pi a (1 + \ln 2\pi \frac{a}{d})} \right] \left[1 + \frac{d}{\pi b (1 + \ln 2\pi \frac{b}{d})} \right] + C_{вх}. \quad (8)$$

Для диэлектриков с существенными потерями на поляризацию в [9, 10, 13, 14] вводится понятие комплексной диэлектрической проницаемости, характеризующей полярные свойства таких диэлектриков и потери энергии на поляризацию

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon (1 - j \operatorname{tg} \delta), \quad (9)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь на поляризацию. С учетом (9) для схемы рис. 3, б можно записать

$$C_{ЕП} = \tilde{\epsilon} \left(\epsilon_0 \frac{S}{d} + C_{кр} \right) + C_{вх}. \quad (10)$$

При отсутствии поверхностной проводимости $R_{ЕП}$ ЕПП плоской конструкции непосредственно определяется из (5). При конечном R_s для $R_{ЕП}$ будет справедливо

$$R_{ЕП} = \frac{R_0 R_s}{R_0 + R_s}, \quad (11)$$

где R_0 определяется по (5).

Из (5), (8) и (10) видно, что электрические параметры ЕПП зависят от электрических параметров $\epsilon(\tilde{\epsilon})$ и ρ диэлектрика и габаритных размеров a , b , d ЕПП.

Эта зависимость лежит в основе измерения различного рода физических процессов, приводящих к изменению электрических параметров диэлектрика $\epsilon(\tilde{\epsilon})$, ρ и габаритных размеров a , b , d ЕПП.

Согласно [15—19], ЕПП относятся к параметрической группе пассивных первичных измерительных преобразователей и делятся на ЕПП с изменяемым расстоянием d между электродами, ЕПП с изменяемой площадью перекрытия электродов и ЕПП с изменяемыми электрическими параметрами ϵ и ρ диэлектрика. Остановимся на перечисленных типах ЕПП подробнее.

2. ЕПП с изменяемым расстоянием между электродами. Характер зависимости общей емкости $C_{\text{ЕП}}$ и активного сопротивления $R_{\text{ЕП}}$ от расстояния между электродами d непосредственно определяется соотношениями (5), (8).

На зависимости $C_{\text{ЕП}}$ и $R_{\text{ЕП}}$ от расстояния между электродами основаны ЕПП для измерения малых линейных и угловых перемещений [17—22], давления [18—20, 23], моментов и усилий [18—20], температуры [18, 19], для контроля размеров изделий и формы их поверхности [18, 20].

Так, например, измерение давления можно производить с помощью ЕПП, один из электродов которого представляет собой упругую мембрану, прогибающуюся под действием внешнего давления [23].

Зависимость габаритных размеров ЕПП от температуры [6] использована для построения ЕПП температуры. Примером такого ЕПП может служить термокомпенсационный конденсатор Philips типа 7364 [19].

При увеличении расстояния между электродами становится существенной краевая емкость $C_{\text{кр}}$, что приводит к неудобству использования выражения (7) в расчетах. Это ограничивает применение ЕПП данного типа областью весьма малых изменений расстояния между электродами, в которой $C_{\text{кр}}$ можно считать постоянной.

3. ЕПП с изменяемой площадью перекрытия электродов. Характер зависимости $C_{\text{ЕП}}$ и $R_{\text{ЕП}}$ от площади перекрытия электродов непосредственно определяется выражениями (5), (8). ЕПП, основанные на изменении площади перекрытия электродов, широко используются при измерении значительных перемещений [18, 20, 24], моментов и усилий [18]. Для ЕПП этого типа величину $C_{\text{кр}}$ можно уменьшить введением защитных электродов [15]. Благодаря малой величине $C_{\text{кр}}$ и, согласно (8), линейной зависимости $C_{\text{ЕП}} = f(s)$, использование таких ЕПП оказывается особенно удобным.

При изменении площади перекрытия электродов ЕПП изменяется площадь открытой поверхности диэлектрика. Если диэлектрик ЕПП хорошо смачивается, то при значительной влажности на величину $R_{\text{ЕП}}$, согласно (11), сильно влияет величина R . Очевидно, в ЕПП данного типа, работающих при больших влажностях, следует применять несмачиваемые диэлектрики.

Примером ЕПП с изменяющейся площадью перекрытия электродов может служить ЕПП перемещения В. И. Тартаковского [24].

В ЕПП, основанных на зависимости $R_{\text{ЕП}}$ и $C_{\text{ЕП}}$ от площади перекрытия электродов и расстояния между ними, в ряде случаев существенна температурная погрешность, вызванная изменением размеров ЕПП от температуры. В [6, 25] анализируется характер этой погрешности и отмечается, что рациональным выбором конструкции ЕПП она может быть уменьшена.

4. ЕПП с изменяемыми электрическими параметрами диэлектрика. Электрические параметры ϵ и ρ диэлектрика могут изменяться с изменением объема диэлектрика, его температуры, плотности и влажности. На этом принципе основаны ЕПП уровня, линейных и угловых перемещений, температуры, давления и влажности.

1. *Зависимость параметров ЕПП от объема диэлектрика.* Изменение объема диэлектрика сопровождается изменением удельного сопротивления ρ и диэлектрической проницаемости ϵ , что, согласно (5) и (8), приводит к изменению $R_{\text{ЕП}}$ и $C_{\text{ЕП}}$. На этом принципе построены ЕПП для измерения перемещений [26, 27] и уровня жидких и сыпучих материалов [18, 28—30].

Влияние изменения объема диэлектрика на $R_{\text{ЕП}}$ и $C_{\text{ЕП}}$ рассмотрено на примере простейшего ЕПП уровня с плоской конструкцией электродов в [18].

2. *Зависимость параметров ЕПП от температуры диэлектрика.* При изменении температуры диэлектрика происходит изменение его электрических параметров ϵ и ρ , что, согласно (5), (8), приводит к изменению $C_{\text{ЕП}}$ и $R_{\text{ЕП}}$. В табл. 1, 2 приведены выражения, связывающие электрические параметры ϵ и ρ диэлектрика с температурой. Очевидно, что с помощью этих зависимостей температура может быть вычислена по измеренным значениям $C_{\text{ЕП}}$ и $R_{\text{ЕП}}$.

На этом принципе основаны ЕПП температуры [18, 31, 32]. В качестве примера рассмотрим ЕПП, описанный в [18]. Он представляет собой отрезок коаксиального кабеля, диэлектрик которого имеет значительный температурный коэффициент TK_ϵ диэлектрика

$$\text{TK}_\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT}. \quad (12)$$

Если известна длина кабеля l , радиус центральной жилы r_1 и проводящей оплетки r_2 , то емкость $C_{\text{ЕП}}$ определяется из (2) с учетом (7).

Если TK_ϵ диэлектрика остается постоянным в диапазоне измеряемых температур (t_0° ; t_k° С), то, проинтегрировав выражение (12) в пределах от t_0° до t° С, получим выражение для $\epsilon = f(t)$:

$$\epsilon = \epsilon(t_0^\circ) e^{\text{TK}_\epsilon (t^\circ - t_0^\circ)}. \quad (13)$$

Тогда с учетом (13) для $C_{\text{ЕП}}$ можно записать

$$C_{\text{ЕП}} = \epsilon(t_0^\circ) e^{\text{TK}_\epsilon (t^\circ - t_0^\circ)} \left(\frac{\epsilon_0 2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} + C_{\text{кр}} \right) + C_{\text{вх}}.$$

Помимо изменения электрических параметров диэлектриков ϵ и ρ с изменением температуры, как отмечалось выше, изменяются также и габаритные размеры ЕПП.

3. *Зависимость параметров ЕПП от плотности диэлектрика.* Плотность диэлектрика, как видно из выражений, приведенных в табл. 1, 2, непосредственно влияет на его электрические параметры, что, согласно (5), (8), приводит к изменению $C_{\text{ЕП}}$ и $R_{\text{ЕП}}$.

На принципе зависимости электрических параметров диэлектрика от его плотности построены ЕПП давления [31, 33]. Так, в [31] описан ЕПП высоких давлений, позволяющий измерить давление в газах. Этот ЕПП представляет собой цилиндрический конденсатор, диэлектриком которого является газ. При увеличении давления увеличивается число молекул газа в измерительной полости ЕПП, что в соответствии с уравнением Клаузиуса—Мосотти (см. табл. 1) вызовет изменение ϵ диэлектрика. Так как электропроводность газов мала, о зависимости $\rho = f(p)$ говорить не имеет смысла.

4. *Зависимость параметров ЕПП от влажности диэлектри-*

ка. Электрические параметры ϵ и ρ диэлектрика существенно зависят от его влажности ω . Исследование зависимости ϵ и ρ диэлектрика от влажности основано на представлении влажного диэлектрика гетерогенной смесью. При этом влажность ω диэлектрика оценивается объемной концентрацией влаги V_v в сухом диэлектрике. В табл. 3 приведены известные из физики гетерогенных смесей формулы смешения [7, 12—14], связывающие электрические параметры диэлектрика с V_v . Здесь приняты следующие обозначения: k определяется взаимным расположением фаз смеси и их положением относительно поля (например, для слоистых структур в случае поля, направленного вдоль слоев, $k=1$; при поперечном направлении поля $k=-1$); $\epsilon_2(\gamma_2)$ и $\epsilon_1(\gamma_1)$ — диэлектрические проницаемости (удельные электропроводности) сухого диэлектрика и влаги соответственно. Приведенные формулы широко используются во влагометрии.

На зависимости электрических параметров диэлектриков от влажности основаны известные во влагометрии диэлькометрический и кондуктометрический методы измерения влажности диэлектрика [7, 34, 35] и построены ЕПП влажности [7, 34, 36—38].

Так, в [34] описан диэлькометрический ЕПП нефтяного влагомера ВН-2. Он представляет собой конденсатор цилиндрической конструкции, емкость и сопротивление которого определяются выражениями (8), (6) с учетом (2). Связь диэлектрической проницаемости с влажностью нефти непосредственно выражается соотношением [34]

$$\epsilon = \epsilon_n \left(1 + \frac{3\omega}{1-\omega} \right); \quad \omega \leq 0,15, \quad (14)$$

где ϵ_n — диэлектрическая проницаемость «сухой» нефти при $t=20^\circ \text{C}$. С учетом (2) можно записать

$$C_{\text{ЕП}} = \epsilon_n \left(1 + \frac{3\omega}{1-\omega} \right) \left(\frac{\epsilon_0 2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} + C_{\text{кр}} \right) + C_{\text{вх}}.$$

Зависимость $R_{\text{ЕП}} = f(\omega)$ можно получить из (6), воспользовавшись логарифмической формулой Лихтенекера (см. табл. 3):

$$R_{\text{ЕП}} = \rho_n \left(\frac{\rho_v}{\rho_n} \right)^{-V_v} \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi l},$$

где ρ_n и ρ_v — удельные сопротивления нефти и воды.

Погрешности, возникающие при измерении влажности рассмотренными методами, объясняются сильной зависимостью параметров ϵ и ρ от множества побочных факторов, например температуры, наличия примесей, существенных контактных и поверхностных явлений и др. [7, 34].

5. *Инерционность ЕПП.* В заключение кратко остановимся на инерционности ЕПП. Инерционность ЕПП определяется инерционными свойствами подвижных частей ЕПП, работающих на принципе изменения расстояния между электродами, площади перекрытия электродов и объема диэлектрика, а также инерционностью процессов поляризации диэлектрика.

Инерционность процессов в ЕПП характеризуется временем установления процесса при скачкообразном изменении измеряемой физической величины. Время установления процесса в ЕПП с изменяющимися параметрами диэлектрика может быть оценено по времени установления процессов поляризации в диэлектрике при скачкообразном изменении внешнего электрического поля (времени релаксации τ_p). Очевид-

Таблица 3

Характер гетерогенной смеси воды с диэлектриком	Диэлектрическая проницаемость смеси	Удельная электропроводность смеси
Чисто физическое смещение двух компонент с частицами произвольной формы и близкими значениями ϵ и γ	$\epsilon^k = \epsilon_2^k + (\epsilon_1^k - \epsilon_2^k) V_B$	$\gamma^k = \gamma_2^k + (\gamma_1^k - \gamma_2^k) V_B$
Мелкодисперсные, хорошо перемешанные бинарные гетерогенные смеси, компоненты которых имеют близкие значения ϵ и γ	$\ln \epsilon = \ln \epsilon_2 + V_B \ln \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)$	$\ln \gamma = \ln \gamma_2 + V_B \ln \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right)$
Гетерогенные смеси, компоненты которых можно представить в виде частиц сферической формы ($V_B \ll 1$)	<p>Формула Максвелла [9, 13, 14]</p> $\epsilon = \epsilon_2 \left[1 + \frac{3V_B (\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \right]$	
Гетерогенные смеси с хаотичным расположением частиц при соблюдении условий изотропности и изодиаметричности элементов и отсутствии существенных контактных и поверхностных явлений	<p>Формула Лоренц—Лоренца [9, 13, 14]</p> $\epsilon = \epsilon_2 \left[1 + \frac{V_B (\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\epsilon_2 + \frac{1 - V_B}{3} (\epsilon_1 - \epsilon_2)} \right]$	<p>Формулы В. И. Одолевского [7, 9]</p> $\gamma = \frac{1}{4} \{ 3V_B (\gamma_1 - \gamma_2) - (\gamma_1 - 2\gamma_2) + \sqrt{[3V_B (\gamma_1 - \gamma_2) - (\gamma_1 - 2\gamma_2)]^2 + 8\gamma_1 \gamma_2} \}$

но, в диэлектриках без потерь этот процесс можно считать безынерционным, так как для них $\tau_p = 10^{-12} - 10^{-15}$ с. Для диэлектриков с потерями (особенно для диэлектриков с преобладающей структурной поляризацией) время τ_p может достигать нескольких секунд. Однако в ряде случаев τ_p диэлектриков с потерями может быть также несущественно. Так, например, для молекул воды $\tau_p = 10^{-8}$ с.

При определенных условиях на инерционность ЕПП дополнительное существенное влияние могут оказать теплообмен и сорбция [14, 39].

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневиц, А. Л. Грохольский, К. М. Соболевский, В. И. Никулин, Е. Е. Добров. Быстродействующие электронные компенсационно-мостовые приборы. М., «Энергия», 1970.
2. Ф. Б. Гриневиц, А. Л. Грохольский, К. М. Соболевский, М. П. Цапенко. Трансформаторные измерительные мосты. Под ред. К. Б. Карандеева. М., «Энергия», 1970.
3. К. М. Соболевский. Электроизмерительные цепи уравнивания и элементы их общей теории.— *Автометрия*, 1965, № 2.
4. К. М. Соболевский. Методы и устройства автоматического контроля конденсаторов (обзор).— *Автометрия*, 1967, № 5.
5. В. И. Никулин, К. М. Соболевский, В. И. Титков. Принципы измерительного преобразования «параметры иммитанса — напряжение» в широком диапазоне частот.— *Автометрия*, 1970, № 2.
6. А. Л. Грохольский, Э. Л. Кашеев, Н. Ф. Шмойлов. О температурной стабильности емкости различных конструктивных форм образцовых конденсаторов.— *Автометрия*, 1966, № 3.
7. М. А. Берлинер. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. М.—Л., «Энергия», 1965.
8. Ю. Я. Иоссель, Э. С. Коганов, М. Г. Струнский. Расчет электрической емкости. Л., «Энергия», 1969.
9. Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобитский, Н. А. Воробьев, Б. М. Тареев. Расчет электрической емкости. Л., «Энергия», 1969.
10. Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. Электротехнические материалы. М.—Л., «Энергия», 1969.
11. Справочник по электротехническим материалам, т. I, ч. 1. Под общей ред. К. А. Андрианова, Н. П. Богородицкого, Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева. М.—Л., Госэнергоиздат, 1952.
12. М. М. Михайлов. Электроматериаловедение. М.—Л., Госэнергоиздат, 1953.
13. Ф. Эме. Диэлектрические измерения для качественного анализа и для определения химической структуры. М., «Химия», 1967.
14. А. В. Нетушил, Б. Я. Жуховицкий, В. Н. Кудин, Е. П. Парини. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
15. А. Л. Грохольский, В. И. Никулин. О перспективах применения емкостных датчиков.— *Автометрия*, 1967, № 1.
16. Г. П. Нубер. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л., «Энергия», 1970.
17. А. М. Туричин. Электрические измерения неэлектрических величин. М.—Л., «Энергия», 1966.
18. Rudi Kautsch. Kapazitive Meßgrößenumformung, т. I, II.— *Archiv für technisches Messen*, 1966, № 361, № 362.
19. И. Форейт. Емкостные датчики неэлектрических величин. М.—Л., «Энергия», 1966.
20. Д. И. Агейкин, Е. Н. Костина, И. Н. Кузнецова. Датчики контроля и регулирования. М., «Машиностроение», 1965.
21. А. П. Гриценко, А. В. Крицкий, И. Н. Магда. Емкостной преобразователь перемещений с изгибающимися электродами.— *Измерительная техника*, 1969, № 3.
22. Ф. Б. Гриневиц, Е. Е. Добров, В. И. Никулин. Мостовой автокомпенсационный измеритель зазоров между ротором и статором турбомашин.— *Автометрия*, 1966, № 5.
23. О. А. Чекмарев, М. М. Захаров, Ю. А. Миронченко. Емкостной датчик давления.— В сб. трудов Ленинградского механического института, № 72. Л., 1969.
24. В. И. Тартаковский. Погрешности емкостных преобразователей перемещения.— *Измерительная техника*, 1967, № 8.

25. К. М. Соболевский, Б. Н. Панков, А. А. Ораевская. Прибор для измерения емкости конденсаторов в цеховых условиях с повышенной точностью.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды VI конференции), т. II. Новосибирск, «Наука», 1966.
26. Tibor L. Foldvargi, Kurt S. Lion. Capacitive Transducers.— Instrum. and Control Syst., 1964, № 11. Экспресс-информация, Контрольно-измерительная техника, 1965, № 10.
27. Kapazitiv Messung langer Wege.— Maschinenbautechnik, 1966, № 12, Экспресс-информация, Контрольно-измерительная техника, 1967, № 7.
28. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневич, А. И. Новик. Емкостные самокомпенсированные уровнемеры. М.—Л., «Энергия», 1966.
29. Л. К. Макаров, В. М. Сверлин. Автоматические устройства контроля уровня. М.—Л., «Энергия», 1966.
30. А. И. Новик. О погрешностях некомпенсированных емкостных уровнемеров.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды VI конференции), т. II. Новосибирск, «Наука», 1966.
31. С. Курт Лион. Приборы для научных исследований. М., «Машиностроение», 1964.
32. V. I. Makhan'kov, I. S. Sidogenko and G. P. Shemonaev. A Capacity Sensor Measuring Very Low Temperatures.— Cryogenics, 1969, № 4.
33. Ю. А. Атанов, В. А. Борзунов. Диэлектрический датчик высоких давлений.— Труды метрологических институтов СССР, вып. 104 (164). М., 1969.
34. И. Ю. Клугман, Н. Б. Ковылов. Диэлькометрические нефтяные влагомеры. М., ВНИИОЭНГ, 1969.
35. И. Ю. Клугман, Н. Б. Ковылов. Схема замещения диэлектрика в диэлькометрических влагомерах.— Измерительная техника, 1970, № 5.
36. А. А. Лапшин. Электрические влагомеры. М.—Л., «Энергия», 1960.
37. С. Д. Звягин. Электрический влагомер для измерения влажности жидких, сыпучих и твердых веществ и емкостные датчики нового типа. Л., ЛДНТП, 1962.
38. Е. С. Кричевский, Э. А. Кальм. Устройство для автоматического контроля влажности железного концентрата.— Обогащение руд, 1969, № 1.
39. М. М. Михайлов. Влагопроницаемость органических диэлектриков. М.—Л., Госэнергонздат, 1960.

*Поступила в редакцию
23 апреля 1971 г.*