

УДК 681.586.772

А.С.ЛЕВИЦКИЙ, канд.техн.наук, А.И.НОВИК, докт.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев), С.И.КОЧЕТКОВ (УкрІТРИ, Киев)

Емкостные ячейки для измерения диэлектрических характеристик горных пород*Предложены емкостные ячейки для измерения диэлектрических характеристик твердых горных пород и минерал**Запропоновано ємнісні комірки для вимірювання діелектричних характеристик твердих гірських порід та матеріалів.*

Измерение диэлектрических характеристик горных пород как особого рода диэлектрических материалов является одной из задач петрофизики — составной части геофизики, наиболее тесно связанной с физикой веществ [7]. Минералы и горные породы в зависимости от состава, структуры, состояния (влажности, температуры) и условий измерения (в частности, частоты тока) могут характеризоваться значениями диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла потерь $\text{tg}\delta$, изменяющимися соответственно от 2,5 до $5 \cdot 10^5$ и от $5 \cdot 10^{-4}$ до 1.

Лабораторное измерение величины ϵ и $\text{tg}\delta$ минералов и пород необходимо для решения следующих задач: 1) выяснения процессов, происходящих в минералах и породах, находящихся в электрических полях; 2) установления связи этих величин с молекулярной и ионной структурой минералов; степенью их чистоты; составом, структурой и текстурой твердой фазы минералов и пород; природой и содержанием порозаполнителя пород; взаимодействием фаз; частотой электрического тока, температурой и давлением; 3) контроля за изменением структуры минералов и пород под действием температуры и давления; 4) наблюдения за динамикой влажности, нефте- и газонасыщенности минералов, почв, пород, полезных ископаемых и определения характера изменения этих свойств по разрезам и площадям; 5) расчетов расстояний распространения радиоволн в горных породах при подземной радиосвязи и радиоразведке; 6) выяснения механизма разрушения пород электромагнитными волнами [4] и т.п.

Измеренные значения диэлектрических характеристик в комплексе с другими физическими величинами, количественно оценивающие то или иное свойство породы, позволяют определять типы

пород, основные их свойства и характер залегания. Последнее существенно для открытия, оценки запасов и качества полезных ископаемых и их рациональной разработки. Повышение точности измерения диэлектрических характеристик позволит повысить качество исследований.

Как правило, величины ϵ и $\text{tg}\delta$ определяют емкостным способом, т.е. посредством предварительного измерения электрической емкости конденсатора определенной формы с помещенным в него исследуемым образцом. При сложных конструкциях конденсатора его обычно называют ячейкой. От правильно выбранной конструкции ячейки во многом зависит точность измерения.

Данная работа посвящена разработке и исследованию емкостных ячеек специального типа, с помощью которых можно будет значительно повысить точность измерений ϵ и $\text{tg}\delta$.

Электроемкостный способ контроля диэлектрических характеристик образцов из интересующих исследователя материалов известен и применяется более 100 лет [5,8]. Так, некоторые рекомендации по таким измерениям, предложенные еще в 1882 году Кирхгофом, и сегодня не потеряли своего значения. Косвенным путем по измеренным диэлектрическим характеристикам можно судить о таких физико-механических параметрах материала как состав, структура, влажность, степень полимеризации (для полимеров), радиопрозрачность, плотность и др. [5]. Данный способ контроля предусматривает введение объекта в электрическое поле конденсатора и определение искомой характеристики материала по его поведению либо по созданной им обратной реакции на источник электрического поля. Эффективность использования емкостного способа в большей мере зависит от знания физических процессов, наблюдающихся

в материале, помещенном в электрическое поле конденсатора. Эти процессы принято рассматривать с двух позиций — макроскопической (электротехнической) и микроскопической (молекулярной). В первом случае изучаются диэлектрические характеристики материала — величины, подлежащие измерению и представляющие собой исходную информацию для решения многих задач контроля материалов; во втором случае — физические процессы на молекулярном уровне, математические модели атомов и молекул в электрическом поле, аналитическое описание их поведения под воздействием электрических сил. Однако накопленный опыт в этой области относится в основном к измерениям на тонких образцах, и далеко не всегда полученные результаты и рекомендации могут быть распространены на объемные образцы различной формы.

В петрофизических исследованиях электрическую емкость при определении диэлектрических характеристик материалов измеряют мостовыми, резонансными и другими методами. При использовании того или иного метода исходят из принятого диапазона частот, свойств пород и заданной точности измерения. Обычно ϵ и $\text{tg}\delta$ пород определяют в диапазоне частот $0-10^8$ Гц. При измерениях на частотах $1-10^6$ Гц применяют мостовые, а при высокочастотных измерениях (от 10^5 до 10^8 Гц) — резонансные или специальные мостовые методы [4,8].

Обычно для исследований, в том числе и снятия диэлектрических характеристик, образцы твердых горных пород подготавливаются в виде цилиндрических столбиков определенного размера. При измерениях в петрофизических лабораториях такой образец, как правило, помещается в поле плоского конденсатора с круглыми пластинами с диаметром, равным диаметру образца [4,8]. Схема такого измерительного конденсатора или измерительной ячейки показана на рис. 1. Она состоит из измерительных электродов 1 и 2, между которыми помещен испытываемый образец 3. Электроды 1 и 2 подключаются к измерительному прибору, например, мосту типа P5083, при этом электрод 1 находится под потенциалом $U_1 = U_p$, а электрод 2 — под потенциалом $U_2 = 0$. Измеряется электрическая емкость C_x ячейки, и по известной формуле для вычисления емкости плоско-параллельного конденсатора (приведенной, например, в [3]), с учетом диаметра D и высоты h образца 3 рассчитывается искомая относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_x .

$$\epsilon_x = \frac{4h}{\pi D^2} \cdot \frac{C_x}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

где $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Недостатком данного метода является большая и нестабильная погрешность измерения, обуслов-

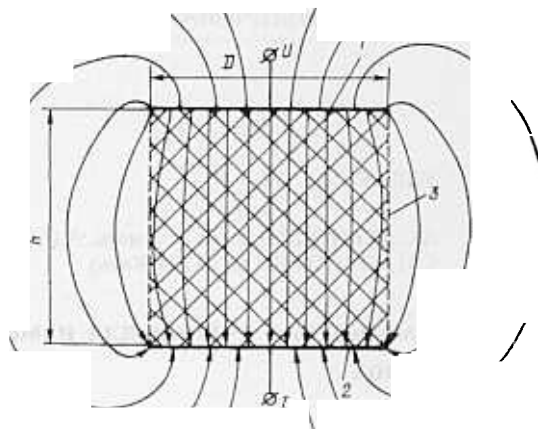


Рис. 1

ленная краевым эффектом и отсутствием электростатической экранировки. Иными словами, в измеренную емкость C_x будет входить не только информативная емкость $C_{и}$ заполненного образцом пространства, но и паразитная емкость $C_{п}$ воздушного пространства по обе стороны от пластин-электродов

$$C_x = C_{и} + C_{п}. \quad (2)$$

Точный расчет поля плоского конденсатора с конечными размерами в однородном диэлектрическом пространстве, аналитические выражения для электрической емкости, а также картина линий электрического поля лучше всего представлены в работе [1]. Расчет же такого конденсатора при заполнении его диэлектриком будет представлять собой гораздо более сложную задачу. Но в некотором приближении, используя результаты [1], можно считать, что величина паразитной емкости $C_{п}$ при равенстве $D \approx h$ (что имеет место в реальных образцах) будет весьма значительной — $C_{п} \approx (0,2-0,3)C_{и}$.

Поэтому существует необходимость в разработке емкостных измерительных ячеек, в которых будут устранены недостатки вышеописанной простейшей конструкции. Ниже предлагаются формы ячеек, которые обеспечивают более высокую точность измерений.

Ячейки замкнутого объема. Одним из способов повышения точности измерений путем исключения паразитной емкости воздушного пространства является помещение исследуемого образца в измерительную ячейку, внутренние размеры которой точно соответствуют размерам образца. При этом боковая или торцевая стороны (или их части) внутреннего цилиндра будут являться электродами конденсатора, подключенного по потенциально-токовой схеме к измерительному прибору [2]. Кроме этого, вся ячейка помещается в заземленный электростатический экран, что при одновремен-

ном помещении в экранирующую оболочку потенциального и токового подводящих проводов позволяет избавиться от всех паразитных емкостей (рис. 2).

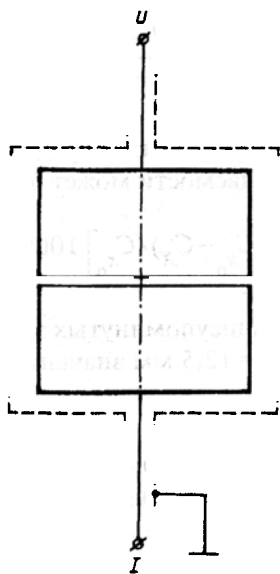


Рис. 2

В принципе внутреннюю цилиндрическую поверхность можно разделить на два электрода сечениями вдоль или перпендикулярно оси цилиндра в любых соотношениях. На рис. 3 показаны различные схемы ячеек: рис. 3, а — потенциальный и токовый электроды выполнены в виде двух равных стаканов с высотой, равной примерно половине высоты образца, т.е. $h_{1.1} = h_{1.2} \approx h_{\text{я}}/2$; рис. 3, б — потенциальный электрод является стаканом с высотой $h_{1.1} = h_{\text{я}}$, а токовый электрод — диск диаметром $D_{\text{ТЭ}}$, при этом $h_{1.2} = 0$; рис. 3, в — потенциальный и токовый электроды выполнены в виде двух равных полуцилиндров.

При использовании для определения ϵ_X ячеек с такими конструктивными схемами применяется экспериментальный метод, который называется методом двух измерений. Сущность его заключается в том, что вначале измеряется емкость пустой, не заполненной ячейки (C_0), а затем емкость ячейки, заполненной образцом (C_X). Выражение для вычисления емкости C_0 можно записать в виде

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_B A, \quad (3)$$

где $\epsilon_B = 1$ — относительная диэлектрическая проницаемость воздуха; A — коэффициент формы, зависящий от геометрических размеров D и h .

Емкость заполненного конденсатора определится как

$$C_X = \epsilon_0 \epsilon_X A \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) искомая относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_X образца определится выражением

$$\epsilon_X = C_X / C_0 \quad (5)$$

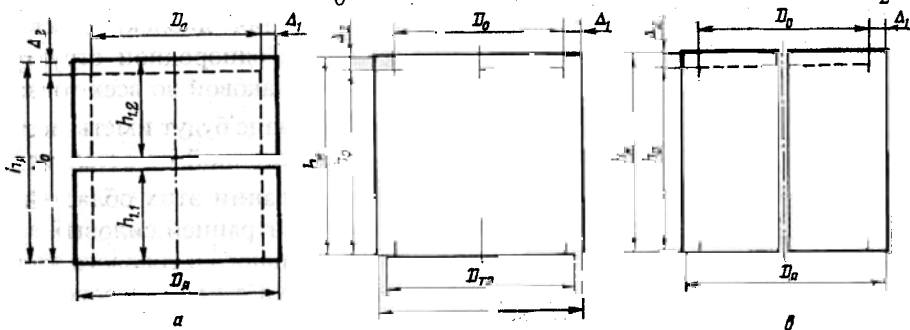
Однако в реальных условиях коэффициенты формы A для пустой и заполненной ячеек будут отличаться. Это объясняется тем, что из-за особенностей технологии изготовления ячейки и образца (величиной допусков), а также в связи с необходимостью свободного, без затирания и заеданий помещения образца в ячейку всегда будут иметь место зазоры Δ_1 между внутренней поверхностью ячейки диаметром $D_{\text{я}}$ и наружной цилиндрической поверхностью образца диаметром D_0 и зазоры между торцами образца и ячейки (рис. 3). Наличие зазоров будет вызывать погрешность δ , которую в первом приближении можно оценить, исходя из следующего: погрешность будет прямо пропорциональна объему зазоров V_z и диэлектрической проницаемости образца и обратно пропорциональна объему ячейки. Следовательно, величину погрешности можно определить как

$$\delta \approx \left(1 - D_0^2 h_0 / (D_{\text{я}}^2 h_{\text{я}})\right) (\epsilon_X / \epsilon_B) 100\%, \quad (6)$$

где $D_{\text{я}}$ — диаметр ячейки; $h_{\text{я}}$ — высота ячейки; D_0 и h_0 — диаметр и высота образца; ϵ_B — относительная диэлектрическая проницаемость воздуха; ϵ_X — искомая относительная диэлектрическая проницаемость образца. При $D_{\text{я}} = h_{\text{я}} = 30,0$ мм, $D_0 = h_0 = 29,7$ мм, $\epsilon_B = 1$, $\epsilon_X = 5$ величина погрешности составит около 15%. Если конструктивно обеспечить, что $\Delta_2 = 0$, т.е. плотно прижать электроды к торцам образца, то погрешность будет меньше.

Используем для расчета погрешности другую методику. Рассчитаем емкость ячейки с образцом при наличии боковых и торцевого зазоров как емкость последовательно включенных воздушного конденсатора и конденсатора, заполненного исследуемым минералом.

Условно будем считать



емкость воздушного конденсатора C_{1B} как сумму емкостей $C_{1.1B}$ и $C_{1.2B}$ двух плоскопараллельных конденсаторов с зазорами $\Delta_1 = (D_я - D_0)/2$, $\Delta_2 = (h_я - h_0)$ и площадями $S_1 = \pi(D_я + D_0)h_0/2$, $S_2 = \pi D_0^2/4$ соответственно. Тогда

$$\begin{aligned} C_{1.1B} &= \pi \epsilon_0 \epsilon_B h_0 (D_я + D_0) / (D_я - D_0) \\ C_{1.2B} &= \pi \epsilon_0 \epsilon_B D_0^2 / 4(h_я - h_0) \\ C_{1.B} &= \pi \epsilon_0 \epsilon_B \left(\frac{D_я + D_0}{D_я - D_0} h_0 + \frac{D_0^2}{4(h_я - h_0)} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Емкость C_{2X} конденсатора, заполненного минералом с проницаемостью ϵ_X будет являться суммой двух емкостей: емкости $C_{2.1X}$ между боковой поверхностью образца и его нижним торцом и емкости $C_{2.2X}$ между торцами образца.

Емкость $C_{2.1X}$ можно определить по формуле, приведенной в [3],

$$C_{2.1X} = \epsilon_0 \epsilon_X \pi D_0 K / K_1,$$

где K_1 — полный эллиптический интеграл первого рода от модуля k_1 ; K_1' — полный эллиптический интеграл первого рода от дополнительного модуля $k_1' = \sqrt{1 - k_1^2}$;

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{(D_0 - D_{ТЭ})(2h_0 + \sqrt{D_0^2 + 4h_0^2})}{D_0(2h_0 + \sqrt{(D_0 - D_{ТЭ})^2 + 4h_0^2})} \\ C_{2.2X} &= \epsilon_0 \epsilon_X \pi D_0^2 / 4h_0 \\ &= \pi \epsilon_0 \epsilon_X (D_0 K_1' / K_1 + D_0^2 / 4h_0) = \\ &= \pi \epsilon_0 \epsilon_X D_0 (K_1' / K_1 + D_0 / 4h_0) \end{aligned} \quad (8)$$

Так как $C_{1.B}$ и $C_{2.X}$ соединены последовательно, то их суммарная емкость составит

$$\begin{aligned} C_X &= C_{1.B} C_{1.X} / (C_{1.B} + C_{1.X}) = \\ &= \pi \epsilon_0 \left(\frac{D_я + D_0}{D_я - D_0} h_0 + \frac{D_0^2}{4(h_я - h_0)} \right) \frac{\epsilon_X D_0}{\epsilon_B} \left(\frac{K_1'}{K_1} + \frac{D_0}{4h_0} \right) \times \\ &\times \left[\left(\frac{D_я + D_0}{D_я - D_0} h_0 + \frac{D_0^2}{4(h_я - h_0)} \right) + \frac{\epsilon_X D_0}{\epsilon_B} \left(\frac{K_1'}{K_1} + \frac{D_0}{4h_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Электрическая емкость ячейки идеально, без зазоров, заполненной исследуемым образцом, будет определяться выражением

$$C_{X_0} = \pi \epsilon_0 \epsilon_X D_я (K_2' / K_2 + D_я / 4h_я), \quad (10)$$

где K_2 — полный эллиптический интеграл первого рода от модуля k_2 ; K_2' — полный эллиптический интеграл первого рода от дополнительного модуля $k_2' = \sqrt{1 - k_2^2}$;

$$k_2 = \frac{(D_я - D_{ТЭ})(2h_я + \sqrt{D_я^2 + 4h_я^2})}{D_я(2h_я + \sqrt{(D_я - D_{ТЭ})^2 + 4h_я^2})}$$

Искомая погрешность определения диэлектрической проницаемости может быть определена как

$$\delta = \left[(C_{X_0} - C_X) / C_{X_0} \right] 100\% \quad (11)$$

Для тех же вышеупомянутых значений $D_я$, D_0 , $h_я$, h_0 , $\epsilon_X = 5$ и $r_{ТЭ} = 12,5$ мм значение погрешности составит 9,8 %.

Полученное значение погрешности рассчитано для самых неблагоприятных условий измерения, когда зазоры, определяемые точностью изготовления, будут максимальными. Если зазор между торцами образца и ячейки можно убрать, плотно прижав ячейку к образцу, то боковые зазоры всегда будут. Поэтому для данного типа ячеек необходима корректировка результатов измерений в зависимости от действительных размеров образцов.

При необходимости выполнения более точных измерений ϵ_X можно применить методику с использованием компьютерных технологий. Для начала нужно выполнить точный расчет коэффициента формы A для выбранного типа ячейки (рис. 3). Готовых аналитических выражений для расчета электрической емкости двухслойного конденсатора, которым можно представить ячейку с образцом при наличии зазоров Δ_1 и Δ_2 , в литературе нам обнаружить не удалось. Поэтому требуется дополнительное исследование с целью получения нужного результата. За теоретическую базу можно взять работы [3,6]. Аналитическое выражение для коэффициента A будет представлять собой формулу с входящими в виде различных функциональных зависимостей $D_я$, D_0 , $h_я$, h_0 , ϵ_B , ϵ_X . Измерив C_X с учетом выражения (4) можно определить ϵ_X . Используя компьютер, процесс можно автоматизировать.

Ячейка однородного электрического поля. Вышеописанный тип ячеек замкнутого объема наиболее подходит для измерения диэлектрической проницаемости образцов с однородной структурой, т.е. когда ϵ_X будет одинаковой во всех точках объема образца. Если в образце будут иметь место локальные области с ϵ_X отличной от остального пространства, то при попадании этих областей в места с повышенной концентрацией силовых линий поля (стыки потенциального и токового электродов) при измерениях будет иметь место погрешность. Для примера на рис. 4 показаны силовые линии электрического поля ячейки типа рис. 3, б.

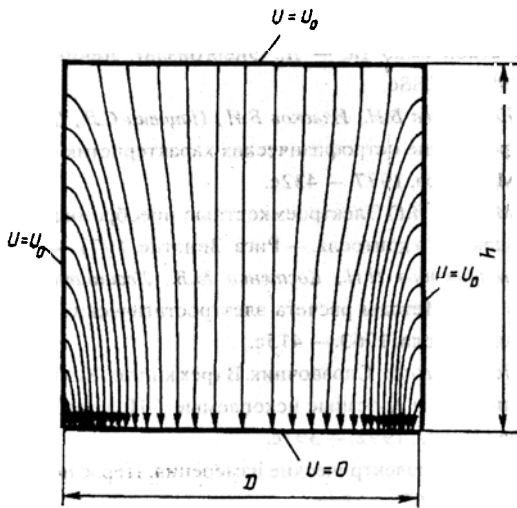


Рис. 4

Очевидно, что для получения внутри цилиндрической ячейки однородного поля, силовые линии которого параллельны друг другу и равномерно заполняют объем ячейки, а краевые эффекты исключены, необходимо, чтобы внутренний объем ячейки был ограничен сверху потенциальным плоским круглым электродом диаметром $D_я$, снизу плоским токовым электродом несколько меньшего диаметра $D_{ТЭ}$, окруженным охранным заземленным кольцом, а цилиндрическая боковая поверхность представляла собой эквипотенциальный экран, принудительно заданный потенциал которого линейно изменяется по высоте от потенциала верхнего электрода до нуля. Реализовать такой идеальный эквипотенциальный экран технически сложно. Без существенного увеличения погрешности можно заменить линейно-изменяющуюся функцию напряжения ступенчатой, выполнив боковую поверхность ячейки из набора проводящих колец, изолированных друг от друга, причем на каждое из этих колец подать напряжение с делителя (например, резистивного), включенного между источником напряжения U_p и землей. На рис. 5 показан один из возможных вариантов такой ячейки. В ней имеется потенциальный электрод 1 ($U_1 = U_p$), токовый электрод 2 ($U_2 = 0$) с охранным кольцевым электродом 3. Электроды 1 и 2 подключаются к измерительному прибору 4 (например, мосту P5083). Боковая цилиндрическая поверхность ячейки делится на N проводящих и изолированных друг от друга участков-колец 5, потенциал которых с помощью делителя $R_1 \dots R_{N-1}$ ступенчато понижается от U_p до 0. Ширина проводящих колец одинакова и равна m , а ширина изолирующих промежутков — n . Номиналы $R_1 \dots R_{N-1}$ равны, рассчитываются с учетом нагрузочной способности моста. Начало делителя подключено к клемме U измерительного прибора (в случае, если используется трансформаторный мост с достаточно низкими выходными сопротивлениями плечевых обмоток, на-

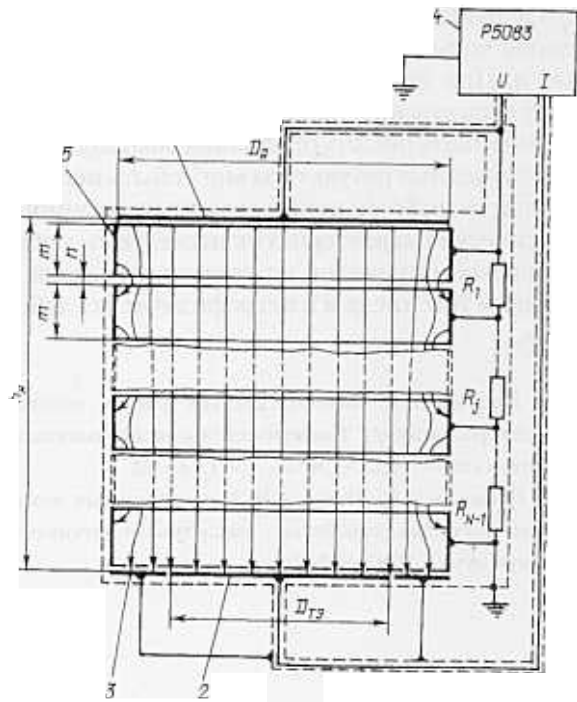


Рис. 5

пример, P5079, P5083 и т.п.), а конец соединен с землей. В результате потенциал j -го кольца ($1 \leq j \leq N$) будет равным

$$U_j = U_p (N-j)/(N-1)$$

Таким образом, боковая поверхность ячейки имеет постепенно снижающийся от U_p до 0 потенциал, что создает в центральной области ячейки соответствующие эквипотенциальные поверхности и, следовательно, зону с близким к равномерному полем. Чем тоньше будут кольца и меньше величина изолирующего промежутка между ними, тем будет шире область равномерного поля. Для вышеупомянутых образцов минералов практически достаточно 8—10 колец. Если правильно выбрать размер токового электрода $D_{ТЭ}$, то можно как бы "отрезать" область с краевыми эффектами и боковыми зазорами и принимать во внимание при расчете только область с равномерным полем. В этом случае, измерив электрическую емкость ячейки C_X с помещенным в нее исследуемым образцом, и зная точные величины $D_{ТЭ}$ и $h_я$, можно сразу рассчитать искомую величину диэлектрической проницаемости

$$\epsilon_X = \frac{4h_я C_X}{\pi D_{ТЭ}}$$

Следует отметить, что выражение (13) применимо только для случая, когда отсутствуют торцевые зазоры Δ_2 (рис. 3).

Важным моментом в данной методике является правильный выбор диаметра токового электрода

$D_{ТЭ}$. Он будет зависеть от размеров ячейки $D_{я}$ и $h_{я}$, ширины кольца m , размера изолирующего промежутка n . При оптимальном выборе величины $D_{ТЭ}$ можно существенно уменьшить и даже полностью устранить погрешность от влияния боковых зазоров.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых средств измерений электрических характеристик исследуемых образцов твердых материалов, изготовленных в виде цилиндров, в том числе и в петрофизических лабораториях.

1. Балабуха Л.И. Математический расчет некоторых полей электростатики // Теоретическая и экспериментальная электротехника. — 1932. — № 1—2. — С. 4—20.

2. Гриневич Ф.Б., Новик А.И. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками. — Киев: Наук. думка, 1987. — 112с.

3. Иосель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. — Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1981. — 288с.

4. Кобранова В.Н., Извеков Б.И., Пацевич С.Л., Шварцман М.Д. Определение петрофизических характеристик по образцам. — М.: Недра, 1977. — 432с.

5. Матисс И.Г. Емкостные преобразователи для неразрушающего контроля. — Рига: Зинатне, 1977. — 255с.

6. Миролубов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л., Тиходеев Н.Н. Методы расчета электростатических полей. — М.: Высшая школа, 1963. — 415с.

7. Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые / Под ред. Дортман Н.Б. — М.: Недра, 1992. — 391с.

8. Эме Ф. Диэлектрические измерения. Пер. с немецкого. — М.: Химия, 1967. — 224с.

Надійшла 18.06.2008

УДК 621.314-621.391

А.Н.БОРИСЕНКО, канд.техн.наук (Нац.техн.ун-т "ХПИ", Харьков)

Вопросы выбора диагностических признаков для систем управления и диагностики дизель-генераторов

Проводится идентификация дефектов, построение решающих правил и формирование обучающих совокупностей для систем управления и диагностики дизель-генераторов на базе теории ЛПСП.

Проводиться ідентифікація дефектів, побудова вирішальних правил і формування сукупностей, що навчають, для систем управління і діагностики дизель-генераторів на базі теорії ЛПВП.

Постановка проблемы. Обеспечение приемлемых технико-экономических и экологических показателей дизель-генераторов тесно связано с поддержанием на должном уровне технического состояния агрегатов и качества работы систем регулирования, которые в процессе эксплуатации изменяются. В связи с этим возникает необходимость непрерывного контроля технического состояния силовой установки в процессе эксплуатации по соответствующим информативным параметрам и диагностическим признакам, которые необходимо выбрать с учетом экспериментальных данных.

Обзор литературы показывает, что диагностирование дизелей производят либо по сигналам множества датчиков режимных параметров агрегата [3,4], либо по сигналу одного датчика неравномерности вращения вала [5—8], что удобнее в плане

привязки к объекту, но усложняет процесс обработки информации. Глубина диагностирования при этом существенно зависит от выбора математической модели диагностического сигнала. Например, в работах [5—8] в качестве таковой был использован линейный периодический случайный процесс (ЛПСП), низшие моменты которого (дисперсия и корреляционная функция) используются в качестве диагностических признаков, и позволяют обнаружить неисправный цилиндр.

Цель работы — на базе математической модели ЛПСП, описывающей процесс неравномерности вращения вала дизеля с учетом случайного его характера и физической природы явлений, происходящих в тепловом двигателе, теоретически обосновать, а затем экспериментально проверить новые информативные параметры, характеризую-