

КОНЦЕНТРАТОРЫ ЭНЕРГИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ – КЭССОРЫ (Энергетика цикла «зарядка — разрядка» конденсаторов)

Москва, 1978 ÷ 1985 гг.

Расширена интерпретация петли гистерезиса: она даёт информацию о выделении и поглощении как тепловой, так и электрической энергии и их взаимоконверсии. Анализ частных петель гистерезиса показал, что в нелинейных конденсаторах (при $N_e > 0$) энергия разрядки может превосходить энергию зарядки (то есть: $\text{tg}\delta < 0$) за счёт охлаждения диэлектрика конденсатора. Эти выводы подтверждены экспериментально тремя способами измерения энергии на варикондах. Такие же результаты по энергетике цикла «Намагничивание – размагничивание» ожидаются в индуктивностях с ферритами или магнитодиэлектриками (когда $\delta\mu/\delta H > 0$): они также способны преобразовывать энергию окружающей среды в электрическую.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Анализ петли гистерезиса.
2. Термодинамические оценки энергетики зарядки и разрядки варикондов.
3. Калориметрические измерения актов зарядки и разрядки емкостей.
4. Измерение энергии актов зарядки и разрядки варикондов.
5. Измерение мощности зарядки и разрядки варикондов.
6. Осциллографирование кулон-вольтных кривых актов зарядки и разрядки варикондов.
7. Выводы.
8. Заключение.
9. Литература.
10. Справка о ходе исследования.
11. Приложения. Расчёты.

1. Анализ петли гистерезиса

Петля гистерезиса в координатах « $Q - U$ » (заряд – разность потенциалов) или « $P - E$ » (поляризация – напряжённость электрического поля) и особенно – петля частного цикла, используются для изучения свойств диэлектриков, особенно – нелинейных емкостей (НЕ) [1, 2]. Однако энергетический аспект информации, содержащийся в кулон-вольтных кривых петли постоянно остаётся без внимания, если не считать утверждений о том, что площадь петли означает уровень потерь энергии. Строго говоря, и это не всегда верно, ибо за диэлектрический гистерезис можно принять нелинейные диэлектрические потери. Возможно, это объяснимо существующей и на сегодня неопределённостью в исходных понятиях о петле. Считается, что элементарное изменение энергии в линейной ёмкости (ЛЕ) и в НЕ $dA_\Theta = U \cdot dQ$, так что площадь между осью ординат (Q) и кривой петли в определённом масштабе представляет энергию ЛЕ, НЕ [3, 4]. Площадь же между осью абсцисс (U) и кривой петли – представляет так называемую *коэнергию* – обходимую вниманием. Она, очевидно, является интегралом её элементарного изменения $dA_s = Q \cdot dU$.

Понятие *коэнергии* введено формально, по необходимости для решения задач, связанных с нелинейными емкостями (индуктивностями), без раскрытия её физического смысла.

Термодинамика ЛЕ хорошо разработана [5], чего нельзя сказать о термодинамике НЕ. Полагая энергию заряженной ёмкости $A = \frac{1}{2} \cdot QU$, находим её элементарное изменение (в единице объёма):

$$dA = \frac{1}{2} \cdot U \cdot dQ + \frac{1}{2} \cdot Q \cdot dU \quad (1)$$

Оно равно сумме изменений энергии и *коэнергии*. Если ёмкость зависит от разности потенциалов, то:

$$dA = \frac{1}{2} U \cdot d[C(U) \cdot U] + \frac{1}{2} \cdot [U \cdot C(U)] \cdot dU = \frac{1}{2} U \cdot [U \cdot dC(U) + C(U) \cdot dU] + \frac{1}{2} U \cdot C(U) \cdot dU. \quad (2)$$

Если же $C = \text{const}$, то из (2) следует, что $dA = C \cdot U \cdot dU = Q \cdot dU = U \cdot dQ$, то есть понятия энергии и *коэнергии* для ЛЕ – совпадают и они равны меж собой численно. Только для НЕ эти понятия имеют различающийся смысл. Однако различие ещё не установлено. А оно, оказывается, существует и далеко нетривиально. Последовательное использование его приводит к новым следствиям в анализе петель гистерезиса. Элемент «энергии» в виде $U \cdot dQ$ означает её изменение (за dt) при $U = \text{const}$ в течение dt вследствие изменения ёмкости: $dQ = U \cdot dC$. А оно происходит спонтанно «катализируемое» полем E в НЕ или ЛЕ. При этом: $dQ = i \cdot dt$, то есть работа внешнего источника на зарядку, есть работа над диэлектриком: $dA_\Theta = U \cdot i \cdot dt = U \cdot dQ$, затрачиваясь на зарядку спонтанно возникающей (дополнительной) ёмкости, сопровождается теплом поляризации, как бы превращаясь в это тепло $d\Theta$ (или частично в механическую работу). Разумеется, процесс $\pm dC$ обычно сопровождается соответствующими по знаку изменениями энтропии в случае изотермического проведения цикла «ЗР».

События разрядки реализуются только вследствие распада упорядоченного состояния (заряженного) диэлектрика, что по необходимости сопровождается ростом энтропии при $-dC$ (снижением – при $+dC$). Именно эти молекулярные явления выделения (или поглощения) тепла обуславливают и запасание, и отдачу электрической энергии в ЛЕ и НЕ. Следовательно, эта часть энергии конвертируема: электрическая энергия \leftrightarrow тепловая энергия. *Коэнергия* же, $Q \cdot dU$, очевидно есть работа источника (dU) над зарядом Q , рассматриваемым постоянным в течение dt , – времени изменения напряжения.

По [6] в ЛЕ (стр. 221) нет *коэнергии*, вся подведённая электрическая энергия (в адиабатном процессе) превращается в тепловую, а при разрядке – наоборот. По [5] же тепло в ЛЕ выделяется лишь при условии, что её диэлектрик имеет $\text{TKE} \neq 0$. С изложенной точки зрения всегда часть вводимой при зарядке энергии превращается в тепловую, а при разрядке – вновь в электрическую.

Как показывает опыт, ни утверждение по [6], ни по [5] – не универсальны: уровень тепловыделения даже в ЛЕ зависит от природы диэлектрика. Эта неоднозначность обусловлена особенностями механизма (природой) запасания подводимой энергии в ЛЕ и НЕ, уровнем сопутствующих изменению напряжённости поля изменения в свойствах диэлектрика (теплоёмкости, объёма, температуры и т. д.). Если же этих изменений нет, то в измеримую тепловую энергию в ЛЕ может превращаться половина энергии зарядки. Относительно НЕ – вопрос сложнее.

В НЕ: с $\delta C/\delta U > 0$, ($\delta \epsilon/\delta E > 0$) по вышеизложенному – энергия $\int dA_\Theta = \int U \cdot dQ$ – обуславливает выделение тепла (совершение механической работы) при изотермической зарядке (нагрев НЕ – при адиабатной), поглощение тепла при изотермической разрядке (охлаждение · при адиабатной). Отношение UdQ/QdU – показывает «цену» элемента тепловой энергии в единицах электрической. В простейшем случае: $C(U) = C_0 + aU$; так что $UdQ/QdU = 1$ в ЛЕ; в НЕ – это отношение равно: $1 + aU/C_0 + aU$. Следовательно, в НЕ в тепло тем больше превращается энергии зарядки, чем выше $a = \delta C/\delta U$ и чем выше напряжение (но не выше U_{max}). Соответственно — и большая часть Θ_s превращается при разрядке в Θ_p . С введённым зарядом $Q(U)$ однозначно связано – в данной НЕ – количество тепла $\Theta(U)$; при выходе заряда $Q(U)$ соответствующее ему тепло $\Theta(U)$

уходит с ним, преобразуясь в электрическую энергию заряда. Если почему-либо тепла при этом недостаёт, оно отбирается у самого диэлектрика за счёт понижения его свободной энергии. Всё это является физическим смыслом положений Миллора и Черри, введённых в 1951 г: *объём и кообъём, энергия и коэнергия* сохраняются [3, стр. 111], как сохраняется и заряд. Все эти процессы показаны на рис. 1а, б, в.

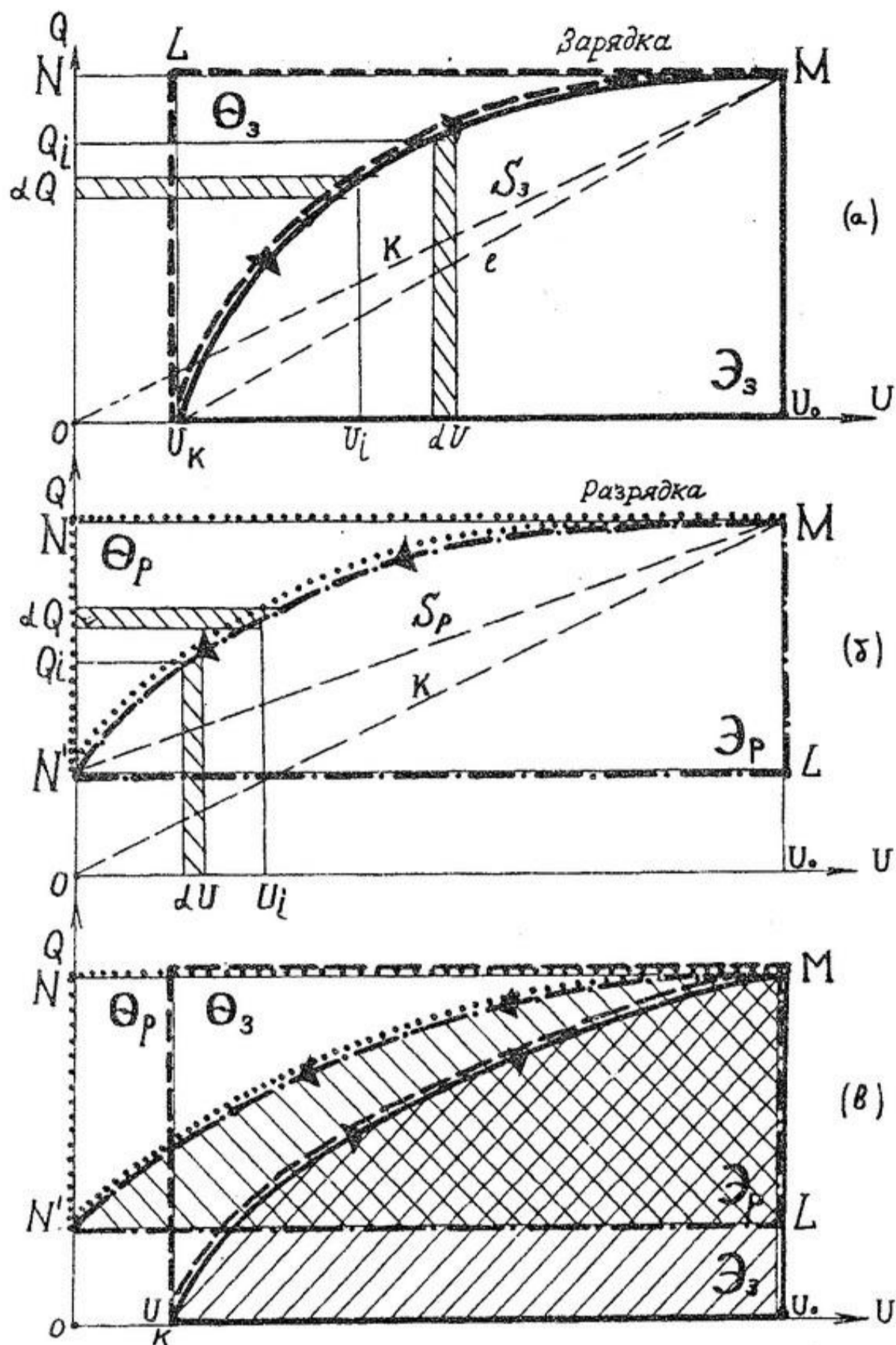


Рис. 1.
а – кулон-вольтная кривая зарядки НЕ;
б – кулон-вольтная кривая разрядки НЕ;
в – петля гистерезиса в I и II квадранте (подробности – в тексте)

Процесс зарядки ЛЕ – изображается прямой пунктирной линией, НЕ – сплошной кулон-вольтной кривой. Половина площади $(\Theta_3) - LU_kML$ над кривой U_kM – представляет (в определённом масштабе) тепло, выделяющееся из НЕ при изотермической зарядке (нагревающее диэлектрик при адиабатной зарядке), то есть энергию, запасаемую в тепловой форме. Энергия, запасаемая НЕ в электрической форме (область \mathcal{E}_3) представляется половиной площади $U_kMU_0 \cdot U_k$ под кривой U_kM . Очевидно, здесь, на рис. 1а, она больше Θ_3 на величину площади S_3 (площадь сегмента U_kMU_k на хорде l). Зарядка начинается с U_k , – напряжения, обеспечивающего преодоление коэрцитивной силы. На рис. 1б изображена кулон-вольтная кривая процесса разрядки. Здесь половина области Θ_p (площадь $N_1M \cdot N$) представляет поглощаемое из среды при разрядке тепло (и, – как условие разрядки, – и как превращающееся в электрическую энергию), а половина площади LMN_1 под кривой (область \mathcal{E}_p) энергию, отдаваемую в виде электрической; речь идёт об энергии, определяемой поляризацией, то есть членом $(\epsilon - 1)$. Энергия, представленная половиной площади ON_1U_0 – остаётся в диэлектрике после окончания разрядки. Хорошо видно, что здесь $\Theta_3 > \Theta_p$, то есть при разрядке поглощается тепла меньше, чем выделяется при разрядке. Ясно, что за цикл «зарядка – разрядка» (полупериод) – диэлектрик нагреется. Из рис. 1в следует, что петля (точнее – полупетля) за один полупериод, имеет площадь (между кривыми зарядки и разрядки), равную разности $\Theta_3 - \Theta_p$ и однозначно характеризует именно только тепловой итог цикла. По энергии, запасаемой в электрической форме, итог цикла находится как разность: $\frac{1}{2} \mathcal{E}_3 - \frac{1}{2} \mathcal{E}_p = \frac{1}{2}$ (пл. MU_kU_0M – пл. $MNLM$, рис. 1в). Видно, что при данном виде кривых: $\mathcal{E}_3 > \mathcal{E}_p$, а это обусловит появление электрических потерь.

Характерным для петли является то, что энергия в ёмкости при разрядке больше таковой для зарядки при одинаковой разности потенциалов, то есть налицо энергетическая несимметрия, обусловленная способностью диэлектрика к спонтанным процессам поляризации или деполяризации. Аналитически это свойство пока не описано с должной обоснованностью.

Во втором квадранте элемент «энергии»: $(-dQ) \cdot (-U)$ – то есть диэлектрик выделяет тепло при «деполяризации» внешним источником энергии, а «коэнергия»: $(Q) \cdot (+dU)$ имеет положительный знак, соответствующий притоку энергии в электрической форме. То же – в третьем квадранте. Имеется в виду изотермический процесс.

Всё вышеизложенное целиком применимо к петлям гистерезиса ферритов и магнитодиэлектриков.

В энергетическом смысле более интересны петли частного цикла, ибо в полном цикле потери энергии неизбежны из-за $U_k > 0$ и окончания

разрядки при $Q > 0$.

Особенности петель частного цикла в варикондах детально описаны в [1] для режимов импульсного воздействия. Характерным для них является разный вид ветвей зарядки и разрядки: разрядная кривая выпукла по отношению к оси абсцисс, ветвь заряда – вогнута. На рис. 2 показан характерный вид петли гистерезиса частного цикла.

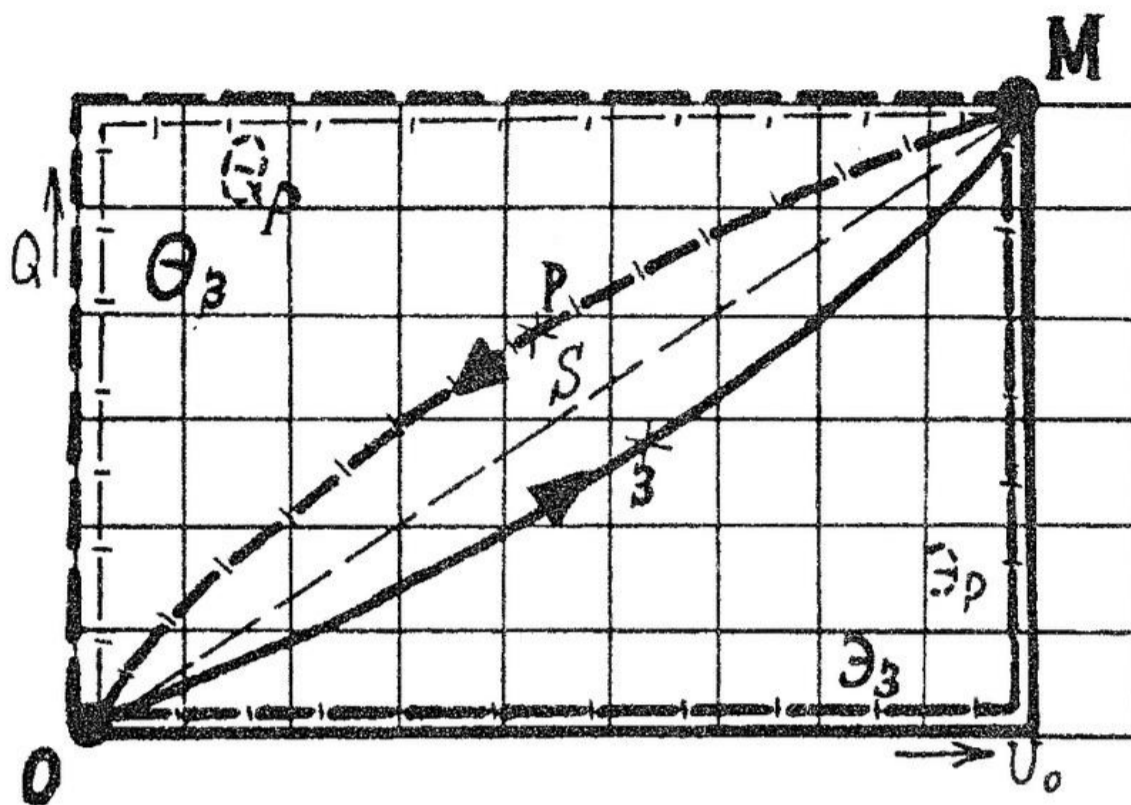


Рис. 2. Петля гистерезиса частного цикла (подробности в тексте)

С учётом вышеизложенного о физической интерпретации областей Θ и Ξ – без пояснений видно, что в этом случае $\Xi_p > \Xi_3$, на площадь фигуры $\frac{1}{2} S$ (ОРМЗО), то есть этот диэлектрик при разрядке отдаст в цепь больше энергии, чем её было введено при зарядке ($\frac{1}{2}$ пл. ОЗМУ₀О). Эта избыточная электрическая энергия возникает за счёт преобразования части тепловой энергии Θ_3 (возникшей из энергии источника при зарядке), именно равной (в масштабе) половине площади веретенообразной фигуры S (ОРМЗО); ей же равна избыточная электрическая энергия.

Чтобы диэлектрик после разрядки возвратился в исходное состояние по диэлектрической проницаемости, он должен поглотить тепла столько, сколько было выделено при зарядке. Но, поскольку часть тепла Θ_3 превратилась в электрическую энергию, недостающее тепло в количестве S будет получено за счёт понижения температуры диэлектрика. Уровень конверсии численно равен отношению площади «веретена» S к площади, представляющей энергию зарядки. Поскольку диэлектрик находится в тепловом контакте с окружающей средой, снижение его температуры обусловит приток тепла от среды. В смысле простоты поддержания режима, при котором будет происходить преобразование тепла окружающей среды в электрическую энергию – особый интерес могут представлять антисегнетоэлектрики с двойной петлёй гистерезиса. Каждую петлю ведь можно порознь рассматривать как петли частных циклов. И именно те, у которых она возникает при более низком напряжении, – и имеют наибольшую площадь. В цепи переменного тока конденсатор с таким антисегнетоэлектриком будет, охлаждаясь, генерировать избыточную электрическую энергию, численно равную (за период) площади одной петли. Имеются в виду конденсаторы из цирконата свинца, ниобата натрия, гафната свинца, дигидрофосфата аммония.

Повторяя циклы «зарядка – разрядка» – по петле частного цикла в обычном НЕ в конечном итоге тоже будем преобразовывать тепло окружающей среды в электрическую энергию.

Таким образом, петля гистерезиса содержит в себе больше информации чем принято считать: она даёт сведения о выделении и поглощении как тепловой, так и электрической энергии и об уровне их взаимоконверсии. В случае варикондов уровень конверсии растёт с понижением температуры, ввиду сильного роста $\partial\epsilon/\partial E$ [1]. Поэтому описываемые далее устройства будут более эффективны в работе, ввиду их «самоохлаждения».

2. Термодинамические оценки энергетике цикла «зарядка – разрядка» НЕ

Приложение разности потенциалов к конденсатору вызывает в нём и в диэлектрике следующие процессы:

- «протекание» и «растекание» тока по обкладкам с нагревом их;
- возникновение магнитных полей от этих токов;
- возникновение тока смещения и поляризованности в диэлектрике;
- возникновение магнитного поля тока смещения и противоположного по знаку тока и магнитного поля от поляризации диэлектрика;
- изменение геометрии диэлектрика;
- изменение температуры диэлектрика;
- изменение теплоёмкости диэлектрика;
- изменение эффективной диэлектрической проницаемости;
- изменение напряжённости электрического поля в диэлектрике;
- изменение плотности свободной энергии в диэлектрике;
- протекание тока омической проводимости через диэлектрик;
- изменение омической проводимости диэлектрика.

Разумеется, нет никакой возможности учесть все эти процессы и их взаимовлияния. Поэтому из всей совокупности выделяются лидирующие процессы.

Внутренняя энергия единицы объёма изотропного линейного диэлектрика в конденсаторе:

$$U = U_0(T) + \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot E^2 + \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot T \cdot (\partial E / \partial T) \cdot E^2 \quad (3)$$

– в обычных обозначениях; $\epsilon = \text{const}$ [5, 7]. Третий член перекрёстный: он имеет вид энергии тепловой: $T \cdot ((\epsilon_0 \cdot \partial \epsilon / 2 \partial T)) \cdot E^2$ или энергии поля: $((\epsilon_0 \cdot E^2 / 2) \cdot \partial \epsilon) \cdot (T / \partial T)$.

Взаимо-конверсию этих видов энергии впервые установил Б. Б. Голицын [Учёные записки Московского университета, № 10, 1, М., 1893 г.], на что, однако, не было обращено внимания. Лишь сравнительно недавно стали изучаться сегнетоэлектрические преобразователи тепловой энергии в электрическую. В явлениях антистоксовой люминесценции такая конверсия обоснована термодинамически (через «цветовую температуру») и, по [8], обнаруживается экспериментально по охлаждению люминофора.

Покажем, что эта конверсия – общее свойство диэлектриков с $\partial\varepsilon/\partial E \neq 0$, пренебрегая диссипативными явлениями от проводимости, стрикции и т. п.

Если в линейном случае дифференциал внутренней энергии единицы объёма указанного диэлектрика в электрическом поле:

$$dU = d\Theta + \frac{1}{2} \cdot D \cdot dE,$$

то для нелинейного диэлектрика, при $\varepsilon(E) = \varepsilon_1 + (\partial\varepsilon/\partial E) \cdot E \dots$, –

$$dU_3 = d\Theta + \frac{1}{2} \cdot D \cdot dE + \frac{1}{2} E \cdot dD, \quad (4)$$

где: Θ – тепло, D – смещение.

Здесь при зарядке:

$$dD_3 = d(\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E) = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot dE + \varepsilon_0 \cdot E \cdot d\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot dE + 2\varepsilon_0 \cdot E \cdot (\partial\varepsilon/\partial E) \cdot dE + \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot d(\partial\varepsilon/\partial E). \quad (5)$$

Положив $\partial\varepsilon/\partial E = \text{const} = b$ на некотором участке $\varepsilon(E)$, получим из (4) и (5) при адиабатной зарядке, когда $\Theta = 0$, –

$$\begin{aligned} dU_3 &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot E \cdot dE + \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot (\partial\varepsilon/\partial E) \cdot dE + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot E \cdot dE + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \cdot (\partial\varepsilon/\partial E) \cdot E^2 \cdot dE = \\ &= \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot E \cdot dE + 3/2 \cdot \varepsilon_0 \cdot (\partial\varepsilon/\partial E) \cdot E^2 \cdot dE. \end{aligned} \quad (6)$$

Отсюда, изменение внутренней энергии при зарядке от внешнего источника (интегрирование от 0 до E):

$$U_2 - U_1 = (\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot E^2)/2 + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot (\partial\varepsilon/\partial E) \cdot E^3 = A_3 = (\varepsilon_0 \cdot E^2/2)(\varepsilon_0 + b \cdot E) = (\varepsilon_0 \cdot E^2/2) \cdot \varepsilon_3, \quad (7)$$

где ε_3 – эффективное значение диэлектрической проницаемости в заряжаемом конденсаторе в конце зарядки.

Этот физический факт следует понимать как возникновение некоторой виртуальной (добавочной) ёмкости C_x , параллельной основной ёмкости C_0 , если $\partial\varepsilon/\partial E > 0$ и уменьшение её на величину C_x при $\partial\varepsilon/\partial E < 0$. При этом $C_x = C_1 \cdot b \cdot E/\varepsilon_1 = C_0 \cdot (b \cdot V)/(h \cdot \varepsilon_1)$, если: V – разность потенциалов на конденсаторе, h – расстояние между обкладками.

Разрядку конденсатора можно описать, если осмотрительно продифференцировать (7), получив частные дифференциалы:

$$dA_3 = (\varepsilon_0/2) \cdot d[E_3^2 \cdot \varepsilon_3] = \varepsilon_0/2 \cdot [\varepsilon_3 \cdot 2E_3 \cdot dE_3 + E_3^2 \cdot d\varepsilon_3] = \varepsilon_0/2 \cdot [2\varepsilon_1 \cdot E_3 \cdot dE_3 + 2b \cdot E_3 \cdot E_3 \cdot dE_3 + E_3^2 \cdot b \cdot dE_3],$$

где: E_3 – напряжённость поля при окончании зарядки.

Интегрируя от E_3 до 0, получим энергию разрядки:

$$A_p = \varepsilon_0/2 \cdot [-\varepsilon_1 \cdot E_3^2 - b \cdot E_3^3] = -(\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot E_3^2)/2 - \varepsilon_0 \cdot b \cdot E_3^3. \quad (8)$$

то есть за цикл:

$$A_3 + A_p = -\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot b \cdot E_3^3 \quad (9)$$

Не исключено возражение о неприемлемости фиксации E_3 в ε_3 . Неоднозначность трактовки аналитических зависимостей, а точнее, – моделей – для нелинейных явлений встречается нередко [9, 10]. Поэтому рассмотрим ещё один путь расчёта ΔU . Виртуальная ёмкость, возникающая параллельно исходной C_0 в НЕ, находится из очевидного соотношения:

$$C_x/C_0 = b \cdot E/\varepsilon_1.$$

Если $k = C_0 \cdot b/\varepsilon_1 \cdot h$, где h – толщина диэлектрика, тогда: $iC_x = kV_i$, если V_i – текущее значение разности потенциалов, а текущее значение энергии –

$$a_i = iC_x \cdot V_i^2/2.$$

В кинетической (динамической) ситуации ($dV/dt \neq 0$) следует записать ${}_3V_i = V_i - dV$ и ${}_pV = V_i + dV$. Тогда виртуальная ёмкость при данном V_i имеет разную энергию при зарядке и разрядке:

$$\delta_{ai} = {}_3a_i - {}_pa_i = (C_0 \cdot b/2\varepsilon_1 \cdot h) \cdot [(V_i - dV)_3^3 - (V_i + dV)_p^3] = -k \cdot 3/2 \cdot V_i^2 \cdot dV. \quad (10)$$

За полный цикл сумма

$$\sum_{i=1}^n \delta_{ai} \rightarrow (3C_0 \cdot b/2\varepsilon_1 \cdot h) \cdot \int V^2 \cdot dV = -\frac{1}{2} \cdot (C_0 \cdot b/\varepsilon_1 \cdot h) \cdot V^3. \quad (11)$$

Полагая h равной единице длины и деля на h^2 , вновь получим:

$$A_3 + A_p = -\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot b \cdot E^3. \quad (12)$$

При адиабатной зарядке, как следует из (7), когда энтропия $S = \text{const}$, –

$$\Delta V_3 = -\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_3 \cdot E^2/2 = S \cdot (T_3 - T_1) \quad (13)$$

и для разрядки-

$$\Delta V_p = S \cdot (T_p - T_3). \quad (14)$$

За цикл «ЗР»:

$$\Delta V = S \cdot (T_3 - T_1 - T_3 + T_p) = -S \cdot (T_1 - T_p). \quad (15)$$

При $b > 0$, $\Delta V < 0$, $T_1 > T_p$ (охлаждение диэлектрика).

При $b < 0$, $\Delta V > 0$, $T_p > T_1$ (нагрев диэлектрика).

Поскольку при $b > 0$ имеем: $T_p < T_1 = T_c$ (температура среды), то, нарушив адиабатность диэлектрика после цикла «ЗР», – вызовем нагрев его за счёт тепла окружающей среды ($T_c > T_p$). Далее можно вновь провести адиабатный цикл «ЗР» и т. д. Из расчёта видно, что имеется в виду идеальный диэлектрик, не имеющий энергетических потерь. Следовательно, условием генерации энергии является положительная нелинейность диэлектрика по напряжённости поля. Что касается антисегнетоэлектриков, то термодинамику цикла «ЗР» для них записать проще, ввиду очень чёткой петли гистерезиса, с учётом выводов п. № 1 относительно петель частных циклов.

3. Калориметрические измерения актов зарядки и разрядки емкостей

Появление в лабораториях серийного прецизионного микрокалориметра ДАК–1–1* открыло реальные возможности измерения тепловых эффектов изотермической зарядки и разрядки емкостей. (*Экспериментальный завод научного приборостроения АН СССР, п/о Черноголовка, Московской области). На этом приборе можно измерять мощности тепловыделения до 50 мВт; объём рабочей ампулы 8 см³, внутренний диаметр 9 мм. Погрешность измерения мощности тепловыделения – не более $\pm 0,7\%$ («по паспорту»). Выбор объектов измерения диктовался внутренним диаметром ампулы. Измерения велись при 40°C; цена деления шкалы самописца $1,173 \cdot 10^{-3}$ Вт/дел, или $2,82 \cdot 10^{-5}$ Дж/мм²; скорость записи – 60 мм/час. Величина разности потенциалов измерялась прибором класса 0,2; ошибка графического интегрирования $\pm 2\%$. Измерялись ёмкости. –

(А). Батарея из трёх параллельно соединённых конденсаторов К-71, 250 В, $0,047 \cdot 10^{-6}$ Ф; их общая ёмкость (мост Р–589, 1 кГц) – при 40° С: $C = 0,1412 \cdot 10^{-6}$ Ф, $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^{-4}$. Толщина плёнки полистирола в таких конденсаторах $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ м.

(Б). Два параллельно соединённых конденсатора МБМ, 500 В, $0,05 \cdot 10^{-6}$ Ф; общая их ёмкость при 40° С на 1 кГц $1,0372 \cdot 10^{-6}$ Ф, $\text{tg } \delta = 0,0062$; диэлектрик – металлизированная бумага.

(В). Батарея из 26 параллельно соединённых конденсаторов КМ-5, 5Н90, 68Н, 50В; при 40°C общая ёмкость $2,2035 \cdot 10^{-6}$ Ф; $\text{tg } \delta = 0,1005$, толщина диэлектрика (керамика) $1,25 \cdot 10^{-5}$ м. Керамика – сегнетоэлектрическая, $\epsilon \geq 8000$, $\Delta C/C = 50\%$ при 40° С от уровня при 0° С [11].

Батарея А заряжалась до 280 В; расчётная энергия заряда $5,55 \cdot 10^{-3}$ Дж (94 мм²). В пределах погрешностей, многократные измерения дали: $\Theta = 0$ при 40° С. Этот неожиданный результат, возможно, объясним повышением теплоёмкости полистирола (здесь $E \sim 28$ кВ/мм). По [5] это изменение теплоёмкости:

$$\Delta C_v(T, p) = T \cdot E^2 \cdot \epsilon_0 \cdot (d^2 \epsilon) / (dT^2). \quad (16)$$

Значение последнего множителя неизвестно, с приемлемой точностью. Если считать, что энергия зарядки $A_3 = \Delta C_v(T, p) \cdot T$, то тогда, очевидно, будем наблюдать: $\Theta = 0$. Значит для полистирола (с учётом A_3):

$$\Delta C_v(T, p) \cdot T = (\epsilon_0 \cdot (\epsilon - 1) / 2T) \cdot E^2(T, p). \quad (17)$$

Тогда, в данном случае, этот неизвестный множитель:

$$d^2 \epsilon / dT^2 = (\epsilon - 1) / 2T^2 = 1,5 / 195 \cdot 938 = 1,5 / 1,96 \cdot 10^5 = 0,77 \cdot 10^{-5}. \quad (18)$$

Расчёты показывают, что при -300°К, в диэлектриках отношение энергии электрического поля к их тепловой энергии (при «предпробивных» значениях напряжённости поля) – не превышает $7 \cdot 10^{-4}$. Следовательно, при таких полях относительное изменение теплоёмкости полистирола в поле:

$$\Delta C_v(E, T, p) / C_v(T, p) = 2,7 \cdot 10^{-4} = 1,4 \cdot 10^{-3}.$$

Если же $C_v(E, T, p)$ определять при $E \sim 0,1 \cdot E_{\text{проб}}$ – как это обычно и делается, – то указанное отношение будет на уровне $1,5 \cdot 10^{-3} \%$ и надёжно зарегистрировать это изменение будет непросто.

Батарея Б заряжалась до 280 В; расчётная энергия $A_3 = 4,07 \cdot 10^{-3}$ Дж; измерения дали $\Theta = 1,58 \cdot 10^{-3}$ Дж, то есть $0,39 \cdot A_3$ (при 40° С).

Батарея В: вначале измерили ёмкость при комнатной температуре, в зависимости от зарядного напряжения (измерение заряда интегратором Ф–190). При изменении зарядного напряжения от 6 В до 40 В отношение Q_u/Q_0 возросло от 1 до 1,37, напряжённость поля от 48 до 320 В/мм. В ячейке калориметра, при 28° С, ёмкость (1 кГц, Р–589) составляла $2,2402 \cdot 10^{-6}$ Ф, при 40° : $2,2035 \cdot 10^{-6}$ Ф. Установлено, что при 40 В и 28° С : $A_{\text{изм}}/A_3 \approx 8,4$, при 20 В и 28° С : $A_{\text{изм}}/A_3 \approx 8$; $A_{\text{изм}}$ – количество выделившегося или поглощённого тепла, A_3 – расчётное количество электрической энергии при зарядке. При 40° С и $U_3 = 75; 37,5; 30; 20$ В: $A_{\text{изм}}/A_3 > 7$. Таким образом, изотермическая зарядка (разрядка) ёмкости до энергии A_3 сопровождается выделением (поглощением) тепловой энергии $\Theta = K A_3(p)$. При этом, как следует из эксперимента, величина K для условий измерения:

- близка к нулю – для полистирольной плёнки;
- равна 0,39 – для металлизированной бумаги;
- равна 6÷8 для – сегнетокерамики с $\epsilon \geq 8000$, в зависимости от температуры и напряжения.

Можно предположить, что сходные явления будут наблюдаться в ферритах и магнитодиэлектриках при актах намагничивания и размагничивания.

4. Измерение энергии актов зарядки и разрядки емкостей

По общепринятому представлению, тангенс угла диэлектрических потерь имеет физический смысл отношения потерянной электрической энергии за цикл «Зарядка – Разрядка» (ЗР) к энергии, введённой в конденсатор при зарядке (A_3):

$$\text{tg } \delta = (A_3 - A_p) / A_3 = \Delta / A_3 = 1 - A_p / A_3. \quad (19)$$

Отрицательная величина $\text{tg } \delta$, очевидно, означает: $A_p > A_3$, что физически обуславливает генерацию электрической энергии конденсатором за цикл «ЗР» за счёт убыли его тепловой энергии. Видимо, впервые такая возможность была указана в 1924 г. Флоренским П. А., когда он писал: «среда... сама производит работу» [12]. В мазерах фактически реализуется «–» $\text{tg } < 5$: «Резонатор молекулярного генератора... можно представить... заполненным средой с отрицательной добротностью» [13]. Ввиду чрезвычайно низкой концентрации молекул в резонаторе лазера, абсолютная величина «выигрываемой» энергии исчезающе мала и на это обстоятельство далее не обращалось внимания. В последние десятилетия активно изучается разновидность такой генерации диэлектриками, – люминофорами. Предполагается, что на 1 Ватт затраченной мощности можно получить до 0,6 Ватта «добавочного» люминесцентного излучения [8], причём, как следствие ожидается сильное (до 25°) охлаждение излучателя. В эксперименте, однако, этого ещё не обнаружено, хотя опыты настойчиво ведутся с 1961 г. Имеется сообщение о якобы наблюдавшихся в опытах (со слюдяными материалами) отрицательных значениях $\text{tg } \delta$ [14] на переменном напряжении. И там, автором сообщения, – убеждённым в невозможности существования «- $\text{tg } \delta$ » – указывается, что причиной такого «недопустимого» результата являются особенности измерения диэлектрических потерь в мостовых схемах. Эти особенности весьма обстоятельно рассмотрены в [15], где указывается и возможная причина появления «- $\text{tg } \delta$ »*.

(*В частной беседе с автором этой статьи, д. т. н. Зарин Д. Д. 20.03.80 сообщил, что он помнит аналогичные сообщения в западной

технической литературе за 1936–1937 гг., в которых результаты также объяснились особенностями измерений на мосте Шеринга. Эти статьи не удалось найти).

На наш взгляд принципиальная непригодность мостовых методов для обнаружения « $\text{tg}\delta$ » обусловлена тем, что в основе их действия заложено спорное представление об универсальной эквивалентности омического и емкостного сопротивлений.

Когда стало очевидным (после трёхлетних попыток), что обнаружение охлаждения ёмкости не реализуемо в наших условиях, так же, как и обнаружение $\text{tg}\delta$ мостовыми методами, – было решено освоить непосредственное измерение энергий A_3 и A_p в одиночных зарядках и разрядках, причём эти энергии $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ Дж. Для ёмкостей $0,01 \div 0,5 \cdot 10^{-6}$ Ф таких методов нет. Известно, однако, применение термопреобразователей типа ТВБ–7,9 для измерения мощности ~ 1 Вт переменных токов силой $\sim 0,5$ А, причём R_n – сопротивление нагревателя в этом преобразователе $\sim 0,5$ Ома [16]. Было проверено предположение, что при импульсном разряде или зарядке таких конденсаторов через R_n термопреобразователя, максимальный отброс гальванометра с малой постоянной времени в цепи терморпары термопреобразователя – будет прямо пропорционален энергии разрядки или зарядки. Известно, что при зарядке от источника с $U = \text{const}$, энергия, запасённая в конденсаторе, в точности равна энергии, выделившейся на сопротивлении зарядной цепи, а при разрядке – вся запасённая энергия конденсатора выделяется на этом сопротивлении. Эти соотношения не верны в случае непостоянства зарядного напряжения в течение зарядки (потери на сопротивлении цепи можно делать сколь угодно малыми, обеспечив оптимальное изменение зарядного напряжения во время зарядки). Если обеспечить сопротивление цепи $\ll R_n$, что легко реализуемо, то оказывается, что максимальный ток в гальванометре, включённом в цепь терморпары термопреобразователя:

$$J_m = U^2 \cdot C / 2 = \alpha / m_c \cdot C_c \cdot (R_{тр} + R_r) = C \cdot U^2 \cdot M,$$

где: M – постоянный коэффициент; α – коэффициент термоЭДС; m_c – масса нагревателя и спая; C_c – их эффективная теплоёмкость; $R_{тр}$ – сопротивление терморпары; R_r – сопротивление гальванометра.

Обратим внимание на то, что при появлении в цепи какого-либо омического сопротивления R_x , включённого последовательно с R_n , энергия будет выделяться и на R_x , отчего величина измеряемой энергии уменьшится на $R_n / (R_n + R_x)$, то есть, – при измерениях получим заниженный результат.

Метод – безусловно справедлив в случае линейных R и C . Энергия при зарядке и разрядке на них выделяется поровну. Очевидно также, что в случае НЕ, например $C(U) = C_0 \cdot (1 + aU/C_0)$, при разрядке на ТВБ, у которого сопротивление нагревателя R_n – вся энергия разрядки A_p выделится на R_n и потому A_p определяется однозначно и в случае ЛЕ, и в случае НЕ. При зарядке в любой момент dt процесса мгновенная мощность:

$$\begin{aligned} \text{на нагревателе:} & \quad i^2 \cdot R_n \\ \text{на ёмкости:} & \quad \frac{1}{2} \frac{d}{dt} [C_0 + aU_c] \cdot U_c^2 \end{aligned}$$

– из дифференцирования энергии, причём $U_c = U_0 - R_n \cdot i$. Поэтому на НЕ мощность имеет вид:

$$- (U_0 - R_n \cdot i) \cdot ((3/2) \cdot a \cdot U_c + C_0) \cdot R_n \cdot di/dt \quad (\kappa)$$

При $a = 0$, то есть в ЛЕ – эти мощности всегда равны:

$$R_n \cdot i^2 = - C_0 (U_0 - R_n \cdot i) \cdot R_n \cdot di/dt.$$

Тогда и в случае НЕ: $(\kappa) = R_n \cdot i^2$, ибо в выражении (κ) в любой момент вместо C_0 стоит $((3/2) \cdot a \cdot U_c + C_0)$.

Этим подтверждается применимость ТВБ в цепях с НЕ. Более того, если $R_n \cdot i = V$, то можно записать очевидное равенство заряда, протекающего через нагреватель и – через ёмкость:

$$(V/R) \cdot dt = dQ_c.$$

Полагая: $U = U_0 - V$ и $C(U) = C_0 + a \cdot U_c$, находим:

$$(V/R) \cdot dt = - (C_0 + aU_0 - aV) \cdot dV.$$

Возведя члены справа и слева в квадрат и разделив на удвоенную текущую ёмкость – получим равные энергии. Это тоже свидетельствует о применимости ТВБ для целей измерения энергий и ЛЕ, и НЕ.

Калибровка измерительного прибора (рис. 3) осуществлялась на воздушном конденсаторе переменной ёмкости, где нелинейности, видимо, исключены в интервале $U = 10 \div 500$ В. Для измерения заряда Q использовался прибор Ф–190 (микровеберметр) – баллистический (точнее – интегрирующий) гальванометр; он же использовался и как короткопериодный гальванометр для измерения A (переключатель рода работы в положении «ноль») на диапазоне «0–100» μWb . Для одновременной работы по определению $A(U)$, $Q(U)$, использовалась схема, приведённая на рис. 3. Для каждой точки проводилось 5–10 измерений; ошибка отсчёта $\pm 0,5$ дел.

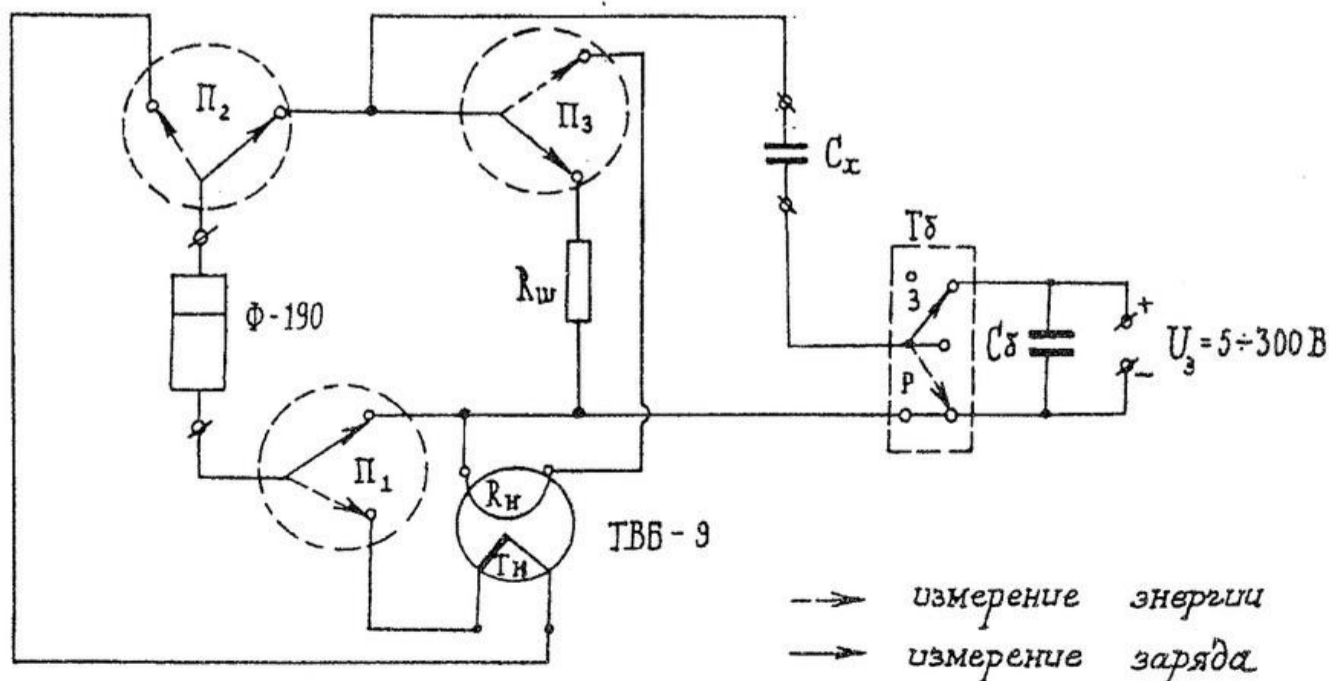


Рис. 3. Принципиальная схема устройства для измерения величины заряда и энергии одиночной зарядки и разрядки конденсатора

Особенности схемы: термопреобразователь помещён в дьюар, обеспечивающий изотермичность; обеспечение постоянства зарядного напряжения достигалось введением балластной ёмкости $C_6 = 450 \div 600 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \gg C_x$ – измеряемой ёмкости; длительность переключения тумблера $\sim (10 \div 15) \cdot 10^{-3}$ сек. Полученные результаты приведены в таблицах в делениях шкалы, пересчитанные к одному диапазону, с указанием цены деления в джоулях или кулонах; минимальная погрешность $\pm 1\%$ при больших отклонениях; максимальная $\pm 2\%$ – при малых отсчётах (≈ 10 дел.).

Целью измерений (проведённых в комнатных условиях) являлось сопоставление величин (с ошибкой $\pm 2\%$) A_3 и A_p , а не измерение их абсолютных значений. Благодаря тому, что $\text{tg} \delta$ находился как отношение результатов измерений, – ошибка в определении $\text{tg} \delta$ уменьшалась. Использовались ёмкости C_x с номерами. –

№ 1. Соединённые параллельно 4 конденсатора КЗIV–3E–5 с номинальной ёмкостью каждого 3600 пФ, слюдяные. При 1 кГц, 80 В, 20° С, на мосте Р–589 общая ёмкость $17492 \cdot 10^{-12}$ Ф, изг. 12.1962 ($R_{ш} = 22,5$ Ом, 1 дел. = $0,84 \cdot 10^{-7}$ Кл).

№ 2. Батарея параллельно соединённых варикондов ВК–105–1 (керамика ВК–4), 8 шт., ёмкость 8×3300 пФ = 26400 пф, изг. 8.1966, рабочее напряжение 35 В; (оно ограничивало измерения по напряжению).

№ 3. Батарея из 16 параллельно соединённых конденсаторов 4 НЗС (04.77 г.) зелёные, $10 \times 10 \times 0,7$ мм. На мосте при 1 кГц ёмкость батареи $0,6883 \cdot 10^{-7}$ Ф, $\text{tg} \delta = 0,0003$, раб. напр. 60 В, 1 дел. = $5 \cdot 10^{-6}$ Дж. Здесь также нельзя было повышать зарядное напряжение более 150 В.

№ 4. Батарея из 6 параллельно соединённых емкостей по $6800 \cdot 10^{-12}$ Ф каждая, вариконды ВК2–3Ш (изг. 01.1964 г.). Измерение заряда при $R_{ш} = 2,8$ Ом, 1 дел. = $6,84 \cdot 10^{-7}$ Кл, по энергии: 1 дел. = $5 \cdot 10^{-6}$ Дж.

№ 5. Батарея из 8 параллельно соединённых конденсаторов КМ6Б М1500. Общая ёмкость $15000 \cdot 8 \cdot 10^{-12}$ Ф; измеренная на мосте Р–589 общая ёмкость $0,1203 \cdot 10^{-6}$ Ф, при 1 кГц, ~ 80 В, $\text{tg} \delta = 0,00005$, $R_{ш} = 11,2$ Ом, 1 дел. = $1,68 \cdot 10^{-7}$ Кл, по энергии: 1 дел. = $5 \cdot 10^{-6}$ Дж.

№ 6. Батарея из 4-х соединённых параллельно варикондов: 1 шт. ВК1–Б 0,15 и 3 шт. ВК2–Б. $0,15 \cdot 10^{-6}$ Ф, 1 дел. = $5 \cdot 10^{-6}$ Дж.

№ 7. Батарея из 19 параллельно соединённых конденсаторов 4ПЗЗ НЗ6И (12.76 г.). Зелёные квадраты $8 \times 8 \times 1$ мм. Общая номинальная ёмкость $360 \cdot 10^{-12} \times 19 = 6840 \cdot 10^{-12}$ Ф, $\text{tg} \delta = 0,0004$ при 1 кГц, мост Р–589.

№ 8. Батарея из 20 соединённых параллельно конденсаторов 4НЗ022Н (12.80 г.), номинальная общая ёмкость $20 \times 20,3 \cdot 10^{-9}$ Ф = $406 \cdot 10^{-9}$ Ф; квадраты $8 \times 8 \times 1$ мм, зелёные, $\text{tg} \delta = 0,007$, мост Р–589, 1 кГц, толщ. диэл. = 0,9 мм. По «А»: 1 дел. = $1,57 \cdot 10^{-6}$ Дж, по «Q»: 1 дел. = $0,84 \cdot 10^{-7}$ Кл.

№ 9. Конденсатор К71–4–0,047–250 В (09.82 г.) – полистирольный, ёмкость на 1 кГц (мост Р–589) $0,04912 \cdot 10^{-6}$ Ф. $\text{tg} \delta = 0,0002$, 1 дел. = $1,57 \cdot 10^{-6}$ Дж.

№ 10. Батарея конденсаторов К71–4–0,056–250В (20 шт. параллельно), $C_x = 1,1280 \cdot 10^{-6}$ Ф, 1 дел. = $1,57 \cdot 10^{-6}$ Дж. $\text{tg} \delta = 0,00014$.

№ 11. Конденсатор с фторопластовым диэлектриком (толщ. 0,10 мм) $C = 27,308 \cdot 10^{-9}$ Ф (с алюминиевой фольгой), $\text{tg} \delta = 0,0009$.

Естественно, в емкостях с малополярными диэлектриками заряд будет линейной функцией приложенного напряжения. Это хорошо соблюдается в опыте на образцах 1, 7, 9, 11 (см. табл. 1). Однако эта линейность не обеспечивает $\Delta = A_3 - A_p = 0$. У № 9 – $\text{tg} \delta$ медленно растёт с ростом напряжения, переходя от отрицательных значений к очень малым положительным (при $U \sim 280$ В). (В 9 толщина плёнки полистирола 0,01 мм). Это косвенно свидетельствует о наличии в этих диэлектриках малой нелинейности ($\partial \epsilon / \partial E \neq 0$), не обнаруживающейся в графическом представлении. У №10 отмечается максимум – $\text{tg} \delta = 0,12$. Установлена линейность заряда от напряжения в слюдяном конденсаторе 1 и в то же время имеется, при $U > 50$ В, $-\text{tg} \delta = 0,08$. Нелинейность заряда образца 5 отчетливо видна: $\text{tg} \delta_5$ имеет максимальное значение – $\text{tg} \delta$ при 60 В, а при напряжении выше 100 В меняет знак и достигает значения $+0,08$ при 130 В. Очень чётко выступает нелинейность образца 4 и 6 (см. Рис. 4).

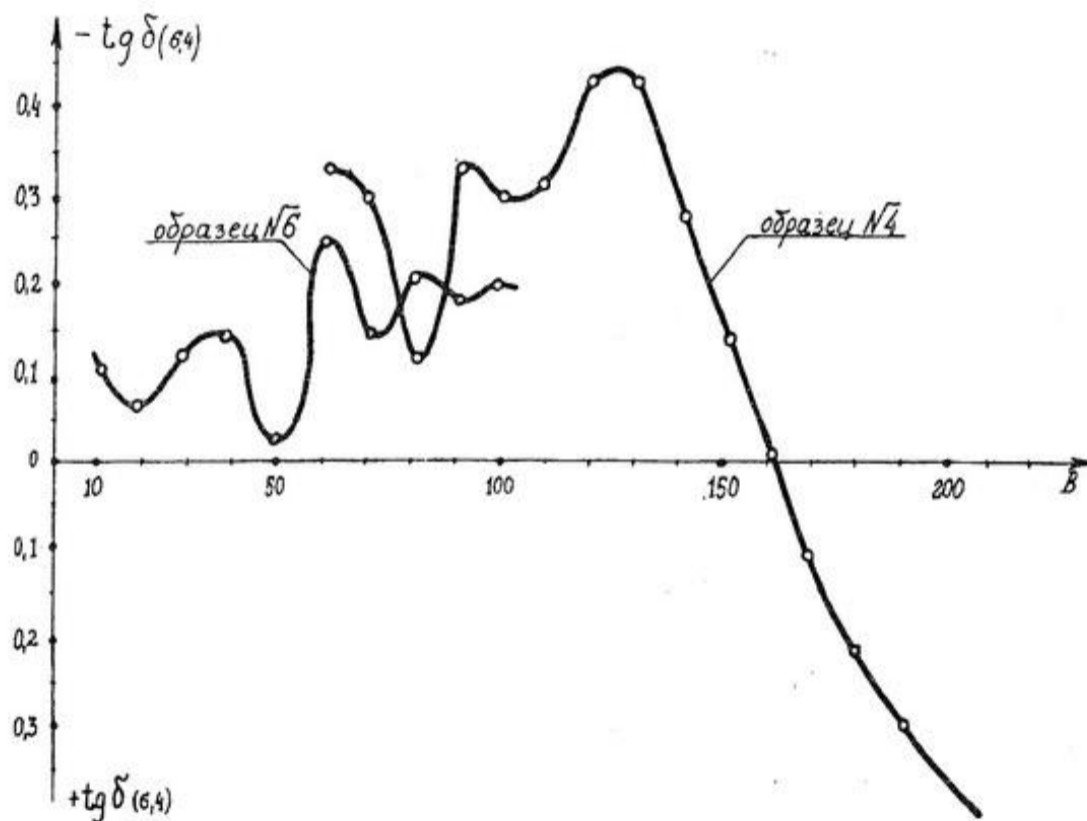


Рис. 4. Зависимость $\text{tg} \delta(U)$ для образцов 4 и 6

Кривые $\text{tg} \delta(U)$ для образцов 5,3 имеют максимумы, а для образца 2 зависимость $\text{tg} \delta(U)$ от 40 до 70 В прямолинейна. Вследствие этого, с ростом зарядного напряжения, $+\text{tg} \delta$ круто поднимается от нуля, становясь положительным и большим по абсолютной величине.

У № 7 отмечается строго линейный ход заряда, а $\text{tg} \delta$ равно нулю во всём интервале напряжений от 100 до 290 В.

У № 8 до 60 В заряд линейен, затем становится нелинейным $\partial \epsilon / \partial E > 0$. Значение $\text{tg} \delta$ отрицательно и сохраняется на уровне $0,1 \div 0,15$ от 10 до 100 В. Из всей совокупности полученных результатов выделяются (рис. 4) зависимости $\text{tg} \delta(U)$ на образцах 4 и 6: они имеют весьма высокие значения « $-\text{tg} \delta$ » (образец 4 при 130 В: 0,45; образец 6 при 60 В: 0,25). Характерно, что $\text{tg} \delta(U)$ у образца 4 также имеет 2 экстремума. Выше говорилось о наличии максимума у них и $\partial \epsilon / \partial E$, и $-\partial \epsilon / \partial E$ именно поэтому принципиально важно обнаружение перемены знака у образца 4 при 160 В и достижение « $+\text{tg} \delta$ » = 0,250 при 200 В. Она исключает возможность предположений о систематической погрешности измерительной схемы. Это подтверждается также фактом $\text{tg} \delta = 0$ у образца № 7, перемены знака $\text{tg} \delta$ у образца № 9 и № 5.

Для № 11 зависимость $Q(U)$ линейна. Неожиданно то, что $\text{tg} \delta$ этого образца знакопеременен и возрастает от $-0,1$ (при 50 В) до $+0,22$ (при 290 В); с общепринятых точек зрения этот образец должен бы иметь $\text{tg} \delta = 0$.

Выводы

1. В конденсаторах 1, 9, 10, 11 ожидалась строгая линейность заряда зарядному напряжению, что и подтвердил эксперимент. Ожидалось

также, что у этих образцов $\text{tg} \delta \sim 0,0001$, опыт же дал знакопеременную зависимость $\text{tg} \delta(U)$, причём абсолютная величина его сравнительно невелика.

2. У остальных образцов обнаруживается или нелинейность $Q(U)$ (№ 5, 4, 8), или нелинейность заряда от напряжения.

3. Образцы 3, 8 и 10 в измеренном диапазоне напряжений имеют только отрицательные значения $\text{tg} \delta$.

4. Образцы 9, 1, 11, 4 – имеют знакопеременную зависимость $\text{tg} \delta(U)$; образец 7 имеет $\text{tg} \delta = 0$.

5. Наибольшее по абсолютному значению « $-\text{tg} \delta$ » имеют образцы № 4, затем 6, и далее 3, 5, 10, 11.

6. Полученные результаты качественно согласуются с исходными теоретическими предпосылками обнаруженного явления. Ввиду неизвестности того, как зависит $d\epsilon/dE$ от величины напряжённости поля, частоты (длительности) циклов «ЗР», от температуры диэлектрика – все стороны явления не установлены. Особую важность имеет факт перемены знака $\text{tg} \delta$, свидетельствующий о перемене знака $d\epsilon/dE$, о зависимости уровня $d\epsilon/dE$ от напряжённости поля и согласующийся с известной зависимостью $\epsilon(U)$ в некоторых (изученных здесь) нелинейных диэлектриках.

На основании вышеприведённых экспериментальных результатов можно считать доступной опытную проверку аналогичными методами наличия генерации электроэнергии нелинейными ферромагнетиками (« $-\text{tg} \delta$ »), когда $(\partial \mu / \partial H > 0)$ в циклах «намагничивание – размагничивание».

5. Измерение мощности зарядки и разрядки варикондов

Естественным развитием метода измерения энергии одиночных актов зарядки A_3 или разрядки A_p явился метод измерения их мощности. Действительно, если в 1 с. происходит n актов зарядки или разрядки, то мощность их $W = n \cdot A$.

Целью измерения мощности зарядки W_3 или разрядки W_p является проверка того, что $\Delta W = W_3 - W_p < 0$, что $W_p > W_3$ при комнатных условиях и оптимальном напряжении зарядки. На рис. 5 представлена схема, позволяющая на основе применения ТВБ, измерять $(n \cdot A_3)$ или $(n \cdot A_p)$, причём $n = 50 \text{ сек}^{-1}$ создавалось путём использования контактной системы реле РЭС22–0С, питаемой от сети 220 В.

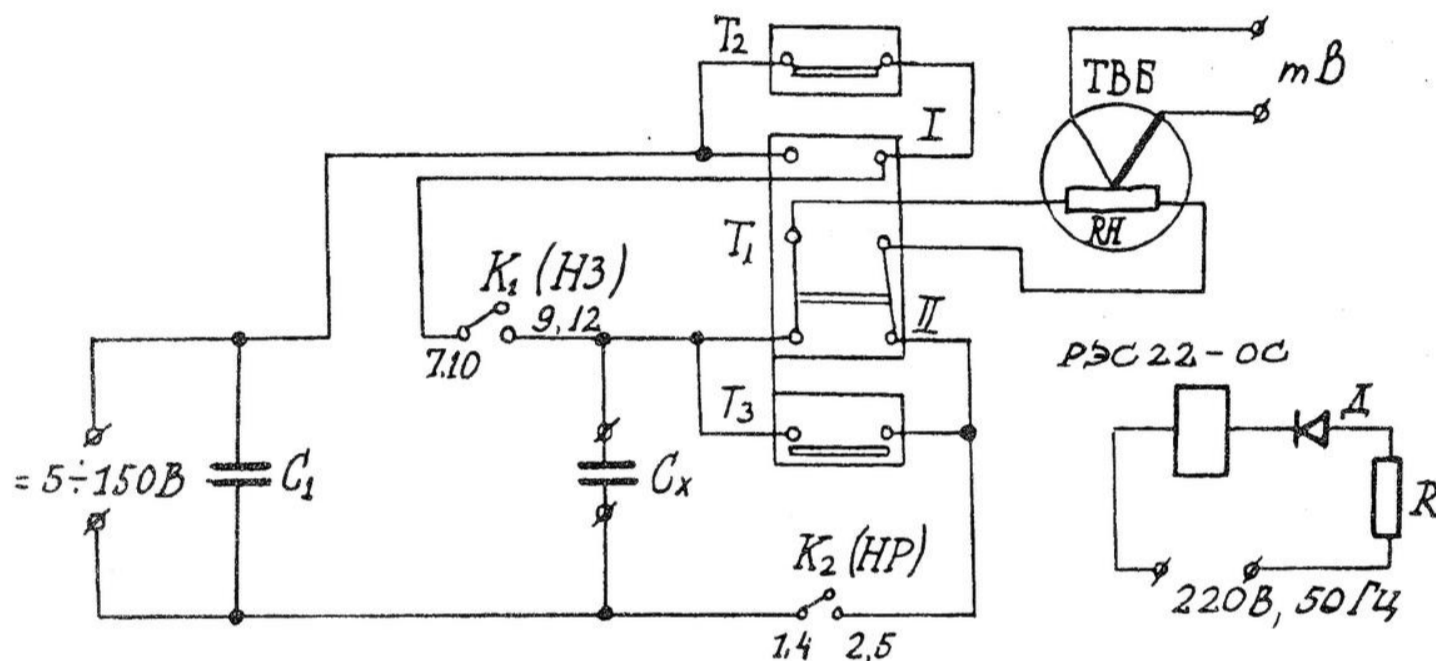


Рис. 5. Схема измерения мощности зарядки и разрядки конденсаторов

Источник питания – выпрямитель Б1–10, внутреннее сопротивление ~ 30 Ом. Схема позволяет измерять эдс на термопаре ТВБ, когда через её нагреватель проходит или ток зарядки, или только ток разрядки. При этом обеспечивается почти идентичное протекание токов зарядки и разрядки в каждом акте «зарядка–разрядка» (сопротивление нагревателя ТВБ–4 равно величине 40 Ом. При измерении мощности зарядки в зарядной цепи имеется только это сопротивление нагревателя ТВБ–4 ~ 40 Ом, а неизмеряемая мощность разрядки гасится на сопротивлении разрядной цепи (переходные сопротивления контактов, проводов $R_{\text{ц}} \sim 0,1$ Ом). При измерении мощности разрядки – в цепи разряда: $R_{\text{н}} + R_{\text{ц}} = 40$ Ом, а в цепи зарядки мощность в это время не измеряется. Заметим попутно, что у ТВБ–7 $R_{\text{н}} \sim 2,2$ Ом, а у ТВБ–9 $R_{\text{н}} \sim 0,8$ Ом. Сопротивление цепи термопары у ТВБ–4 – 11 Ом, ТВБ–7 $\sim 2,4$ Ом, ТВБ–9 $\sim 0,8$ Ом. ТермоЭДС измерялась прибором М265 М (шкала 100 μA) с внутренним сопротивлением 477 Ом, кл. 1,5; 1 дел = 0,477 мВ. Мощность – прямо пропорциональна термоЭДС (мВ). Измерения мощности зарядки «З» и разрядки «Р» линейного конденсатора типа МБМ $0,025 \mu\text{F} \pm 10\%$ 160 В, 02.83 г. показали следующее ($1 \text{ мВ} = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$):

W_3 , мВ	Напряжение зарядки, В	W_p , мВ	$\text{tg} \delta$
5	50 В	5,0	0
14,8	80 В	14,8	0
22,0	105 В	22,0	0

Как видим, в случае обычного линейного конденсатора: $W_3 = W_p$ в пределах ошибок измерений ($\pm 0,3\%$). Затем измерения проводили на батарее из 4-х параллельно соединённых варикондов ВК– 2–3 III (01.64 г.) с начальной ёмкостью $6800 \cdot 10^{-12}$ Ф каждый, так что ёмкость батареи $0,0272 \cdot 10^{-6}$ Ф, то есть близка к ёмкости испытанного выше линейного конденсатора. Измерения дали следующие результаты:

W_3 , мВ	Напряжение зарядки, В	W_p , мВ	$\text{tg} \delta$, %
4,77	49	4,77	0
11,9	70	12,9	–8,4
16,7	80	18,2	–9
21,6	90	24,8	–14,8
23,9	95	28,7	–20,9
26,7	100	31	–16
32,5	110	36,8	–13,3
24,8	95	28,8	–16,2

Как и ожидалось, при оптимальной напряжённости поля, при зарядке, (соответствующей разности потенциалов 95 В) наблюдается максимум избыточной мощности. Снижение или повышение её относительно оптимального уровня приводит к снижению этой избыточной (выигрываемой) мощности. Если иметь в виду зависимость ёмкости вариконда от приложенной разности потенциалов, полученные результаты совершенно

естественны. Видно также, что при возврате к 95 В после 110 В, избыточная мощность уменьшается, не повторяется результат полученный ранее. Связано это с остаточной поляризацией или с общеизвестным явлением «усталости» сегнетоэлектриков. Оно легко разрушается кратковременным воздействием гармонического напряжения убывающей амплитуды (по аналогии с размагничиванием).

Мощность отдельных актов зарядки и разрядки измерялась с помощью описанного в п. 3 микрокалориметра ДАК-1-1. Особенностью измерений являлось следующее обстоятельство: в ячейку калориметра помещалось омическое сопротивление $R_n = 5,6$ Ом, включённое последовательно в цепь конденсатора, энергии зарядки и разрядки которого исследовались. При разрядке вся энергия отдаваемая, конденсатором, очевидно, выделяется на R_n ; то же при зарядке: выделяющаяся на R_n , энергия равна энергии, запасённой конденсатором. Для измерения энергии на ДАК-1-1 нужно было измерять площади под кривой мощности на ленте самописца (с учётом скорости движения ленты). Но поскольку заряд или разряд длятся максимум $(10 \cdot R_n \cdot C)$, (меньше миллисекунды), а постоянная времени калориметра ~ 20 сек, то тепловой импульс от R_n на ленте самописца (при скорости 60 мм/час) был очень острый и определение площади было бы сопряжено с большими ошибками. Потому мы сочли возможным судить о мощности по амплитуде (высоте) импульса. А мощность однозначно связана с энергией, ввиду равенства длительности зарядки и разрядки.

Результаты измерений мощности зарядки W_z и разрядки W_p по тепловыделению R_n , находящемуся в ячейке калориметра при 40°C .

1. Конденсатор КБГ-П, 01.1970 г. бумажно-масляный; $C_n = 5,937 \cdot 10^{-6}$ Ф на 1 кГц.

При 30 В, $W_z = W_p$, при 90 В – мощность возросла в 9 раз, как и ожидалось. Затем зарядное напряжение увеличено, но снижена ёмкость до $1 \cdot 10^{-6}$ Ф (чтобы увеличить напряжённость поля в изоляции). При 100 В: $W_z = W_p$, при 220 В: $\text{tg} \delta = -0,0246$; при 230 В: $\text{tg} \delta = -0,03$. Следовательно, повышение напряжённости поля в данной изоляции обусловило появление « $-\text{tg} \delta$ ».

2. Батарея из 80 шт. конденсаторов КМ-5 Н90 по $68 \cdot 10^{-9}$ Ф, $C_m = 5,9337 \cdot 10^{-6}$ Ф (на 1 кГц). Зарядное напряжение изменялось от 25 до 80 В, $\text{tg} \delta \geq 0$.

3. Конденсатор К-76-П, 63 В, 06.77, лакоплёночный, $C_n = 15 \cdot 10^{-6}$ Ф. При 20 В: $\text{tg} \delta > 0$;

при 40 В: $\text{tg} \delta = 0,04$; 60 В: $\text{tg} \delta = -0,049$; 80 В – 0,064; 100 В – 0,048; 125 – 0,01. Как видим, при напряжении, почти вдвое превосходящем номинальное – начинается спад по абсолютной величине « $-\text{tg} \delta$ ». Очень высокая напряжённость поля, видимо, приводит к столь неожиданному результату.

4. Полистирольные конденсаторы К-71-4, $0,056 \cdot 10^{-6}$ Ф $\pm 5\%$, 250 В, 11.73 г.– 10 шт.– параллельно. При 250 В: $\text{tg} \delta > 0$. При добавлении 10 шт. по $0,047 \cdot 10^{-6}$ Ф, когда $C_n = 1,051 \cdot 10^{-6}$ Ф на 1 кГц – от 40 до 294 В: $\text{tg} \delta < 0$ и $\sim 0,01$.

5. Конденсаторы КМ-5 4Н30, 20 шт., $C_n = 0,417 \cdot 10^{-6}$ Ф, при 90–125 В: $\text{tg} \delta > 0$.

6. Конденсаторы КМ-6Б М 1500 3Н9И, 50 шт. параллельно, $C_n = 0,196 \cdot 10^{-6}$ Ф (1 кГц), при 100–150 В: $\text{tg} \delta = 0,01$.

7. Вариконды ВК1-Б (1 шт.), ВК2-Б (3 шт.) по $0,15 \cdot 10^{-6}$ Ф, соединён параллельно, $C_n = 0,413 \cdot 10^{-6}$ (при 1 кГц).

При 90 В: $\text{tg} \delta = -0,1$; при 125 В: $\text{tg} \delta = 0,19$. Следовательно, и прямой метод измерения мощности (энергии) свидетельствует о способности нелинейных диэлектриков ($d\epsilon/dE > 0$) отдавать при разрядке энергии больше, чем её было введено при зарядке.

6. Осциллографирование кулоно-вольтных кривых актов зарядки и разрядки варикондов

Общепринято снимать «установившиеся» кулон-вольтные кривые (КВК), то есть их вид на экране осциллографа при непрерывной подаче выбранных импульсов. Нашей же задачей было получение КВК для отдельных актов «З» или «Р» или цикла «ЗР». Естественно, для этой цели более всего подходит осциллограф с памятью; мы вели измерения на двухлучевом осциллографе С-8-13, в ждущем режиме запуска.

На рис. 6 приведена схема Сойера-Тауера для снятия КВК. Общеизвестным её достоинством является то, что всегда $Q_{cx} = Q_{cg}$, что позволяет проводить количественные оценки энергии Φ и Ξ по КВК.

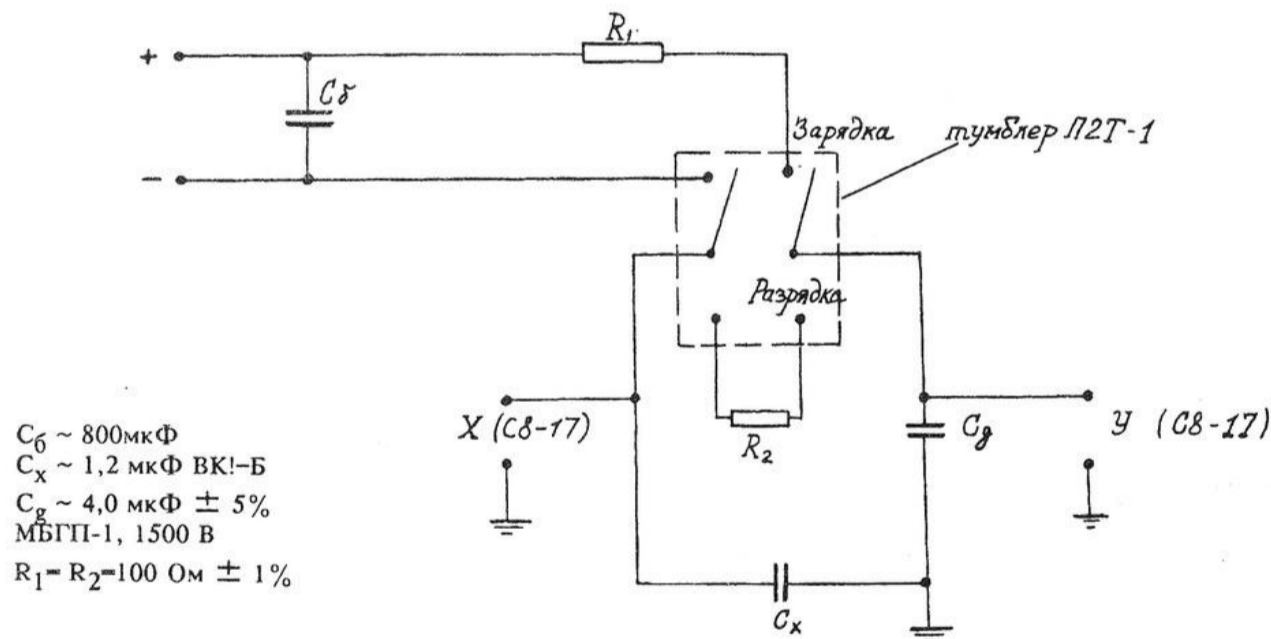


Рис. 6. Схема для снятия кулоно-вольтных кривых актов зарядки и разрядки НЕ C_x

Если же в схеме (рис. 6) вместо C_g включить резистор, то на экране получим кривую мощности. Её интегрирование по времени тоже могло бы дать значение энергии и зарядки и разрядки. Только ввиду большой трудоёмкости мы не воспользовались этим методом.

На рис. 7 – копия осциллограммы линейного конденсатора включённого как C_x ($0,5 \mu\text{F}$ КБГ-П + $1 \mu\text{F}$ МБМ). КВК здесь строго линейны, причём линия зарядки находится над линией разрядки, что обеспечивает обычные потери. На рис. 8, где представлена копия осциллограмм «Зарядка» (нижняя кривая) и «Разрядка» (верхняя кривая) варикондов; хорошо видна веретёнообразная площадь, исчерпывающе характеризующая энергетику цикла ($U_0 = 105$ В) «ЗР» варикондов ВК1-Б, $1,2/4$ F.

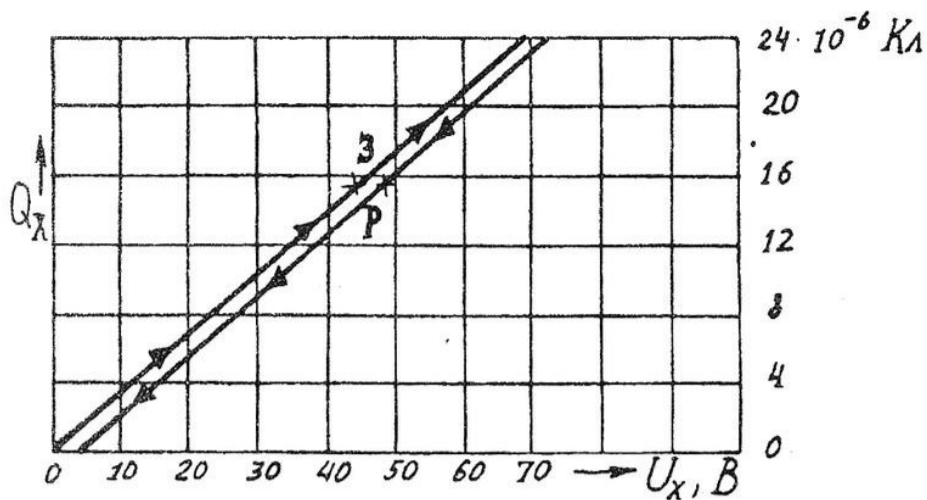


Рис. 7

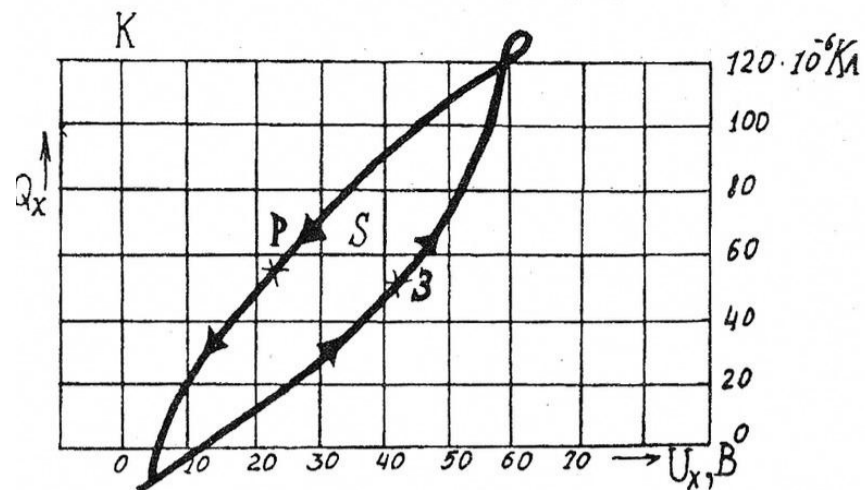


Рис. 8

$A_3 = \frac{1}{2} \cdot 120 \cdot 10^{-6} \cdot 60^2 = 60 \cdot 10^{-6} \cdot 3,6 \cdot 10^3 = 21,6 \cdot 10^{-2}$ Дж; ей соответствует площадь: $\frac{1}{2}$ пл. 60.М.К.060 = HO SO=18 см² = 1800 мм²; $\frac{1}{2}$ площ. S = 376 мм², то есть «-tgδ» = -0,208. Нетрудно видеть, что этот результат, полученный в мае 1985 г. близок к результату на этих же варикондах (см. п. 4, образец № 6), при 105 В: из кривой рис. 8 следует «-tgδ» = 0,22 при измерениях в отдельном акте «ЗР» выполненных в октябре 1983 года. Совпадение результатов следует считать весьма удовлетворительным. Вид этих петель общеизвестен [1].

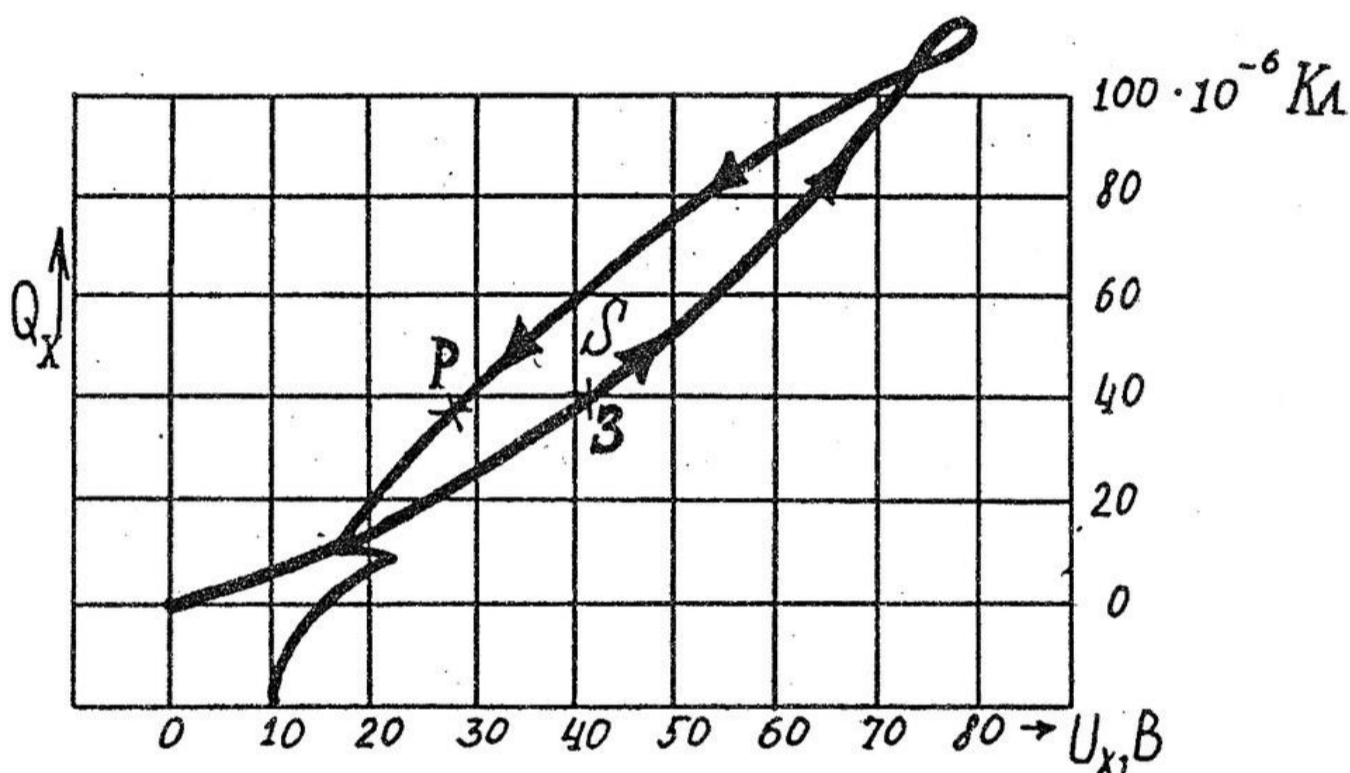


Рис.9

Повышение зарядного напряжения до 136 В, как следует из вида осциллограммы (рис. 9) КВК на том же вариконде, – привело к уменьшению «веретена» S, то есть к снижению -tgδ. Затем были сняты многие осциллограммы КВК при 100, 75, 60, 50, 20 В. Все они имели сходный, веретенообразный вид с сильно уменьшающейся по мере снижения напряжения, – площадью «веретена» S. Подробная интерпретация этих петель частных циклов была дана выше (в п. 1). Здесь только необходимо подчеркнуть примечательное совпадение общих выводов п. 1 с конкретными результатами. Отметим такую деталь: при R ~ 100 Ом, Cx ~ 3μF, RC ~ 3·10⁻⁴ сек, то есть процессы успевают протекать за 1 мс, и потому приемлема частота циклов на уровне 100 с⁻¹.

7. Выводы

1. Кулон-вольтная кривая петли гистерезиса (1 квадрант) разделяет области энергии, находящейся в ёмкости в виде тепловой или механической (над кривой) и собственно электрической; в ЛЕ – эти энергии равны.

2. Электрическая энергия, вливаясь в заряжаемую ёмкость, разделяется на совершающую работу над диэлектриком U·dQ и превращающуюся в тепло dΘ и совершающую работу над зарядом Q·dU; при разрядке – эти обе энергии сливаются вновь в электрической форме; в ЛЕ – эти энергии равны.

3. В НЕ при зарядке (при Ne > 0), кулон-вольтная кривая выгнута вниз, области Θз > Эз. При разрядке кулон-вольтная кривая выпукла вверх, область Эр возрастает за счёт области Эз. Ввиду полной разрядки – должно поглотиться тепло Θр = Эз. Тогда недостающее тепло (Эз – Эр) – отбирается от диэлектрика, он охлаждается относительно исходной (до начала цикла) температуры. То же – в НИ.

4. Итогом частного цикла «ЗР» является преобразование тепла окружающей среды в электрическую энергию с охлаждением диэлектрика, появлением «-tg δ».

Тремя различными экспериментальными методами на варикондах показано, что энергия разрядки может превосходить энергию зарядки на 20÷40%.

Показателем эффективности преобразования тепловой энергии в электрическую в НЕ служит отношение площади «веретена» S (петли частного цикла), к площади энергии зарядки.

Аналитическая зависимость величины преобразуемой за цикл «ЗР» в электрическую тепловой энергии имеет следующий вид для единицы объёма диэлектрика:

$$\Delta A = - \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot b \cdot E^3$$

8. Выводы 2–7 справедливы для НЕ с $\partial \epsilon / \partial E > 0$; при $\partial \epsilon / \partial E < 0$ появятся дополнительные потери энергии в диэлектрике.

9. Для ферритов и магнитоэлектриков с $\partial \mu / \partial H > 0$ справедливы все аналитические выражения при замене ϵ , E, D, на μ , H, B.

10. Разработаны удобные методы измерения энергии и мощности актов зарядки и разрядки с применением термоэлектрических преобразователей типа ТВБ.

11. Для целей преобразования энергии окружающей среды в электрическую могут быть перспективны конденсаторы с антисегнетоэлектриками, способные конвертировать тепловую энергию в электрическую в цепи гармонического тока, работая на петле гистерезиса полного цикла, в том числе – в резонансном контуре.

12. Описанные методы конверсии тепловой энергии в электрическую с охлаждением диэлектрика не имеют ничего общего с методами охлаждения диэлектрика, когда после зарядки ёмкость доводят до температуры охлаждаемой среды – и затем разряжают, используя электрокалорический эффект.*

(* Radebaugh R. и др. Возможности использования электрокалорического эффекта в интервале $4\div 15^\circ$ Л. *Cryogenics*, 19, N9 4, 187–208, 1979. На стеклокерамике (основа – титанат стронция) при 120 кВ/см. получено $T = 0,02^\circ$ – одинаковое по величине и разное по знаку при зарядке и разрядке. Признано, что при современном состоянии физики диэлектриков – их применение неперспективно. См. также: М. Лайнс, А. Гласе. «Сегнетоэлектрики и родственные им материалы». – М., Мир, 1981 г.).

8. Заключение

- Теоретически обосновано и экспериментально обнаружено тремя способами неизвестное ранее явление: способность некоторых диэлектриков с $\partial\epsilon/\partial E > 0$ в оптимальных условиях генерировать электрическую энергию за счёт своей тепловой энергии (охлаждаясь при этом) в циклах «зарядка–разрядка», когда отдаваемая при разрядке энергия превосходит вводимую энергию при зарядке. То же возможно в нелинейных ферромагнетиках с $\partial\mu/\partial H > 0$ в циклах «намагничивание–размагничивание».
- Наибольшей способностью к генерации обладают диэлектрики нелинейные; неожиданно оказались (слабо) способными к генерации и такие диэлектрики, у которых этой способности не должно бы быть по современным представлениям. Полученный результат становится термодинамически легко приемлемым, если пользоваться образом *эксэргии*. *Эксэргический метод* дополняет методы термодинамики тем, что *эксэргия тепла* отличается от *количества тепла*. Обращение к *эксэргии* позволяет включать в систему и окружающую среду [17]. В терминах эксэргического термодинамического анализа получение энергии вышеописанным способом не является спорной неожиданностью. Полезно упомянуть, что охлаждение прозрачного вещества полем облучения уже давно теоретически обосновано с более формальных позиций [18]. Расчётная величина энергии за цикл «ЗР» хорошо согласуется с экспериментальной (см. п. 11).
- Совокупность имеющихся на сегодня сведений о конверсионных свойствах НЕ – позволяет приступить к созданию концентраторов энергии окружающей среды – *кэссоров*. По мере возрастания мощности они вначале заменят источники питания в бытовой радиоаппаратуре, затем станут источниками энергии для целей освещения, а далее – конкурентами двигателей внутреннего сгорания.

9. Литература

1. Вариконды в электронных импульсных схемах, под редакцией В. Ю. Булыбенко. – М., «Советское радио», 1971 (271 с.).
2. Плужников В. М. Диэлектрические усилители. – М., «Энергия», 1969 (320 с.).
3. Бессонов Л. А. Нелинейные электрические цепи. – М., «Высшая школа», 1977 (343 с.).
4. Абрагам – Беккер. Теория электричества. – Л., М., ОНТИ, 1936 (281 с.).
5. Сычёв В. В. Сложные термодинамические системы. 3-е изд. – М., «Наука», 1980 (207 с.).
6. Поплавко Ю. М. Физика диэлектриков. – Киев, «Вища школа», 1980 (392 с.).
7. Голицын Б. Б. Учёные записки Моск. университета, 1893, № 10, 1. (Избр. труды, I, М., 1960).
8. Чукова Ю. П. Антистоксова люминесценция и новые возможности её применения. – М., Сов. радио, 1980.
9. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. ГИФМЛ, М., 1958., стр. 17–18.
10. Фельдбаум А. А. Введение в теорию нелинейных цепей. – М., Л., Госэнергоиздат, 1948.
11. Справочник по электрическим конденсаторам, – Кишенёв, «ШТИИИИЦА», 1982 (310 с.).
12. Флоренский П. А. Диэлектрики и их техническое применение. М., Кубуч, 1924.
13. Басов Н. Г., Прохоров А. М. ДАН СССР, 101, I, 1955 (47/49).
14. Goffaux R. *Rev. gen. elec*, 89, № 5, 405–413, 1980.
15. Сборник стандартов США по испытанию электроизоляционных материалов. – М., Энергия, 1979 (стр. 197–202).
16. Безекович А. Я., Шапиро Е. З. Измерение электрической мощности в звуковом диапазоне частот. – Л., Энергия, 1980.
17. Соколов Е. Я., Бродянский В. М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. – М., Энергоиздат, 1981.
18. Шапиро В. Е. Охлаждение вещества высокочастотным резонансным полем. // ЖЭТФ, том 70, вып. 4, 1976 (стр. 1463).

10. Справка о ходе исследования

Предположение о энергетической несимметрии процесса зарядки и разрядки возникло в 1962 году при отыскании причин существования электретов. Оно было высказано в диссертации автора в 1968 году. («Исследование по электретам», МЭИ, Москва). Исходной же точкой этих представлений послужило давнее высказывание Флоренского (см. литературу) с которым автор был ознакомлен благодаря проф. Яманову С. А. Однако, прошло ещё 10 лет, прежде чем удалось вплотную заняться энергетикой цикла «Зарядка–Разрядка» ЛЕ и НЕ. С июня 1978 г. по июнь 1985 г. было поставлено множество опытов. Результаты их изложены в следующих статьях и работах автора (ещё кочующих по редакциям журналов, сборников, канцеляриям). –

1. Охлаждение диэлектриков и ферритов меняющимся полем с генерацией энергии, 16 стр. 09.1981 г.
2. Экспериментальное обнаружение генерации энергии диэлектриками (обнаружение отрицательных потерь в конденсаторах) 24 стр., 9 рис., 01.1983 г.
3. Калориметрические исследования конденсаторов в цепи переменного тока, 7 стр. февр. 1984 г., с Жуковым С. М.
4. Калориметрические исследования теплоты актов зарядки и разрядки конденсаторов, 11 стр., с Жуковым С. М., февраль 1984 года.
5. Исследование зависимости ёмкости конденсаторов от напряжения зарядки 11 стр., апрель 1984, с Жуковым С. М.
6. Условия генерации энергии нелинейными диэлектриками и ферритами, май–декабрь 1984 г.
7. Заявка на изобретение «Способ преобразования тепловой энергии в электрическую» (на ферритах) № 3601726/25(084904) от 3 июня 1983 г., Заев Н. Е., Горшунов Е. С.
8. Заявка на изобретение «Способ преобразования тепловой энергии в электрическую» (на диэлектриках), заявка № 3601725/24(084905) от 3 июня 1983 г. Заев Н. Е., Горшунов Е. С.
9. Доклад на секции физики МОИП при МГУ «Охлаждение некоторых конденсированных диэлектриков меняющимся полем с генерацией энергии» 12.02.80 и о ферритах – 18.03.80 г.
10. Статья в журнале «Химия и жизнь» № 3, 1984 г.
11. Доклад на заседании клуба «Инверсор» при журнале «Техника – молодежи» 20.01.84.
12. Заявка на открытие 32–01–10159 20.09.80 г. «Охлаждение некоторых диэлектриков меняющимся полем с генерацией энергии».

13. Рукопись «Близкая даль энергетики» была взята для публикации журналом «Знание–Сила» (10.83–04.84), затем отвергнута. С 09.84 – рукопись в редакции журнала «Изобретатель и рационализатор».

В апреле 1981 г. доложено об этой работе и её перспективах академику Шереметьевскому Н. Н. Он заявил – это-де не наш профиль... Больше я к нему не обращался.

С членом редколлегии журнала «Энергия» Шпильрайном Э. Э. велась длительная переписка; затем он был ознакомлен с результатами и схемой измерений мощности «ЗР» на варикондах (п. 5). Его сотрудник Давыдов А. Н. (5.12.84–15.02.85) изучал материалы п. 5 с Шпильрайном Э. Э. (Институт высоких температур). Они пришли к выводу, что схема измерений даёт неверные результаты.

Измерение мощности по п. 5 проводилось, в порядке демонстрации, 4.12.84 в кабинете академика Иосифьяна А. Г. в его присутствии (ВНИИЭМ). Он заявил «Не верю этим результатам; их нужно получить только осциллографом» (что и сделано). Результаты п. 5 были переданы 03.85 секретарю общественного института «ЭНИН» т. Шакирову Р. Г. (Ощепкову П. К.). Вся работа проводилась самостоятельно, консультироваться или обсуждать возникавшие ситуации было не с кем, ибо коллеги не разделяли моего энтузиазма.

Техническую помощь в проведении измерений иногда оказывал Жуков С. М., а в оформлении рукописей – Горшунов Е. С., за что я им очень признателен.

Работы 3.4.5 – докладывались на коллоквиумах отдела 28 ВНИИЭМ в течение 1984 г., где работаю с 1956 г.

11. Расчёты – иллюстрации технических характеристик концентраторов энергии окружающей среды (кэссоров) на «НЕ» и «НИ»

1. Используемая в измерениях п. 6 батарея варикондов ВК1–Б, 6 шт. соединены параллельно, имеет вес $6 \times 25 \text{ г} = 150 \text{ г}$. Диаметр диска диэлектрика – 25 мм; эквивалентный диаметр – из-за неполного покрытия напылённым электродом площади диска $\sim 24 \text{ мм}$, толщина диска $\sim 0,75 \text{ мм}$. Напряжённость поля (оптимальная, по результатам п. 4 (№ 6) $E_0 = 105/0,00075 = 1,4 \cdot 10^5 = 0,14 \text{ кВ/мм} = 140 \text{ В/мм}$. Это значение близко к указанному в [1, стр. 40] для переменного напряжения, обеспечивающего максимум ёмкости. Причём, ϵ возрастает от 2000 до 17000, то есть в 8 раз, так что:

$$b = 15000/140 \cdot 10^3 = 15/140 = 0,107 \text{ [м/В]}$$

Теплоёмкость материала вариконда: $C_v = 0,26 \text{ [к·кал/кг·град]}$; плотность $\approx 5,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$

$$\Delta A_v = \frac{1}{2} \cdot 0,107 \cdot 8,851 \cdot 10^{-12} \cdot (1,4 \cdot 10^5)^3 \text{ Джоуль/м}^3 = 4,427 \cdot 10^{-12} \cdot 0,107 \cdot 2,56 \cdot 10^{15} = 1,21 \cdot 10^3 = 1210 \text{ Дж/м}^3$$

или:

$$\Delta A_m = 0,22 \text{ Дж/кг.}$$

По данным п. 6 измеренная энергия заряженной батареи этих варикондов при 105 В: $A_3 = 21,6 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$. При весе 150 г это соответствует энергии на единицу массы:

$$\Delta A_m = 21,6 \cdot 10^{-2} / 0,15 = 144 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 1,44 \text{ Дж/кг.}$$

Отсюда: « $-tg\delta$ » = $0,22/1,44 = 0,153$, тор есть ниже, чем определено прямыми измерениями. Имея в виду всевозможные неточности величин, входящих в расчёт (плотности, b , определения A_3 и др.) – совпадение расчётной величины ($\Delta A_v - A_m$) с экспериментом следует считать очень хорошим. Понижение температуры за цикл, расчётное, при $\Delta A_m = 0,22 \text{ Дж/кг} = 0,053 \text{ кал/кг}$.

$$\Delta T = 0,053/2600 = 5,3 \cdot 10^{-2} / 2,6 \cdot 10^3 = (2,04 \cdot 10^{-5})^\circ \text{К.}$$

Разумеется, обнаружить такое изменение температуры практически невозможно за один цикл. В адиабатных условиях температура понизится на 2°К после проведения 100 000 циклов. Как выше указывалось (п. 6), допустимая частота циклов на варикондах $\sim 100 \text{ сек}^{-1}$, так что охлаждение на 2° можно ожидать при этой частоте циклов – через 16–17 минут работы устройства. На конденсаторах с антисегнетоэлектриками эти частоты на 2–3 порядка выше, хотя удельные ΔA – могут оказаться ниже, чем у варикондов.

Однако, адиабатные условия практически нереализуемы из-за лучистого теплообмена.

Если мощность генерации $W_2 = W_3 \cdot tg\delta(U) \cdot v$, то мощность лучистого теплопритока:

$$W_{\text{л}} \approx \sigma \cdot b' \cdot 4 \cdot T_{\text{cp}}^3 (T - T_{\text{cp}}) \cdot S_n,$$

где: v – частота, σ – коэффициент теплопоглощения $\sim 0,6$,

b' – постоянная Стефана, $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4]$,

S_n – площадь теплообмена, T_{cp} – температура окружающей среды.

Дальнейшие расчёты показывают, что в лабораторных масштабах $\Delta T \sim (3 \cdot 10^{-2})^\circ \text{К}$ уже обеспечивает мощность теплопритока, равную генерируемой мощности $W_{\text{г}}$. Лишь с возрастанием величин ΔA_m , ΔA_v – то есть удельных весовых или объёмных характеристик генерируемой мощности – могут появиться задачи обеспечения теплопритока извне к кэссору.

Из п. 4 (№ 4, вариконды ВК2 – 3Ш) следует, что « $-tg\delta$ » может достигать 0,45 при 135 В.

У этих варикондов по (п. 10.1): $b \sim 0,25 \text{ м/В}$, и потому удельные характеристики будут в два–три раза лучше, чем у ВК1–Б, ибо сохраняется толщина диска 0,75 мм, как и у ВК1–Б.

Тогда, приняв, что на ВК2–3Ш $\Delta A_m = 0,7 \text{ Дж/кг}$, при частоте 300 Гц (циклов) будем иметь генерируемую мощность 210 Вт, циркулирующую (при $-tg\delta = 0,45$) $\sim 450 \text{ Вт}$. Масса активного диэлектрика 1 кг.

Всё устройство (кэссор) будет иметь большую, втрое-вдвое массу за счёт устройств питания. Кэссоры на антисегнетоэлектриках будут иметь лучшие весо-габаритные характеристики, ввиду того, что они могут работать (генерировать) находясь в элементарном (самоподстраиваемом) колебательном контуре с устройством отбора мощности.

2. Для ферритов и магнитодиэлектриков выражение выигрываемой за цикл энергии идентично таковому для нелинейных диэлектриков при замене обозначений:

$$\Delta A_v = \frac{1}{2} \cdot b'' \cdot \mu \cdot H^3.$$

Для феррита 6000 НМ1* начальное значение проницаемости ≈ 6200 при $H = 0$, а при $H = 17 \text{ А/м}$, $\mu = 7600$ при частоте 5 кГц, причём, – рост строго линейный, то есть $\partial\mu/\partial H = 1600/17 = 95$. Плотность этого феррита $\sim 5 \text{ г/см}^3$. Следовательно, при проведении частного цикла «намагничивание – размагничивание» единица объёма даст избыточную энергию:

$$\Delta A = - \frac{1}{2} \cdot 95 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 17^3 = - 47,5 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 4970 = - 4,75 \cdot 1,26 \cdot 4,97 \cdot 10^{-2} = 29,8 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/м}^3.$$

При частоте 5 кГц это будет $50 \cdot 29,8 = 1490$ или 1,49 Вт/литр, 0,298 Вт/кг.

При такой частоте вариконды были бы предпочтительнее, но она нереальна для них. И, тем не менее, как показано выше, уже при 300 Гц применение варикондов предпочтительнее. Однако не исключены иные ферриты, с лучшими свойствами (с более высокими значениями H_{max}), что может обеспечить им превосходство над варикондами или антисегнетоэлектриками.

(* Преображенский. Магнитные материалы и элементы. Высшая школа, М., 1976 (стр. 145).

Таблица 1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАРЯДА И ЭНЕРГИИ ЕМКОСТЕЙ ПРИ ЗАРЯДКЕ И РАЗРЯДКЕ В КОМНАТНЫХ УСЛОВИЯХ (ДЕЛЕНИЕ ШКАЛЫ)

1	U, В	50	100	150	200	250	290						
	Q «З»	9	17	26	34	$R_{ш} = 22,5 \text{ Ом}$							
	Q «Р»	7,5	16	24	31	$I_{д.} = 0,84 \cdot 10^{-7} \text{ Кл.}$							
	A «З»	7	27	57,5	105	165	230						
	A «Р»	7	29	57,5	110	180	215						
	tg δ	0	- 0,074	0	- 0,048	- 0,031	+ 0,091						
2	U, В	30	40	60	70								
	A «З»	10	25	56	90								
	A «Р»	10	18	35	40								
	tg δ	0	+0,28	+3,75	+0,55								
3	U, В	20	30	50	75	100							
	A «З»	13	27	52,0	105	185							
	A «Р»	14	32	60	110	205							
	tg δ	- 0,078	- 0,186	- 0,155	- 0,475	- 0,11							
4	U, В	160	150	140	120	110	100	90	80	70	60	50	
	Q «З»	47	41	34	29	25	20	16	11,5	8,5	6,5		
	Q «Р»	44	41	33	27	23	19,5	15,5	11	7	6		
	U, В	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	
	A «З»	3	6	10	19	24	38	55	77	105	145	210	
	A «Р»	3	8	13	21	32	49	73	110	150	185	240	
	tg δ	0	- 0,333	-0,3	- 0,105	- 0,340	- 0,29	- 0,330	- 0,430	- 0,430	- 0,275	- 0,142	
	U, В	160	170	180	190	200							
	A «З»	290	390	470	675	825							
	A «Р»	290	340	370	475	525							
	tg δ	- 0,00	+0,128	+0,202	+0,296	+0,364							
	5	U, В	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	125
Q «З»		20	27	34	—	52	—	—	72	—	86	—	—
Q «Р»		20	26	34	—	50	—	—	70	—	84	—	—
A «З»		43	70	80,0	90	—	—	240	410	960			
A «Р»		46	65,0	105	110	—	—	245	440	825			
tg δ		- 0,070	- 0,070	- 0,314	- 0,222	—	—	- 0,021	—	—	+0,073	+0,067	
6	U, В	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
	A «З»	9	37	80	150	240	380	700	930	1700	2150		
	A «Р»	10	39	90	170	245	470	800	1120	2000	2550		
	tg δ	- 0,11	- 0,054	- 0,125	- 0,133	- 0,24	- 0,142	- 0,204	- 0,177	- 0,197			
	U, В	10	20	40	60	80	100	120	130	140	150		
	Q «З»	28	66	164	296	480	736	1060	1210	1370	1530		
(на 1 шт. ВК1-Б, $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$)													

Продолжение Табл. 1

7	U, B	20	40	60	80	100	120	150	200	250			
	Q «3»	16	32	49	65	78	98	120	—	—			
	Q «P»	15	29	45	60	75	90	112	—				
	A «3»				3	5	8	17,5	32				
	A «P»					3	5	8,0	17,5	32		1 д. = 1,57·10 ⁻⁶ Дж	
	tg δ					0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
8	U, B	5	10	20		30	40	60	80	100			
	Q «3»	24	50	108			224	336	500	623			
	Q «P»	25	50	108	—		208	290	484	591			
	A «3»	—	9	39		92	175	410	775	1200			
	A «P»	—	10	45		102	200	470	890	1400			
	tg δ	—	- 0,11	-0,154		- 0,109	-0,147	-0,111	- 0,167				
9	U, B	20	40	60		80	100						
	A «3»	57	240	540		1080	2350						
	A «P»	59	260	570		1100	2200						
	tg δ	- 0,035	- 0,085	- 0,055		- 0,02	+0,064						
	U, B	10	20	30		40	50	70	100	150	170	200	250
	Q «3»	20	42	62		80	100	144	216	320	368	430	545
10	U, B	5	—	—		10	—	—	20	30	40	50	60
	A «3»	9				33			145	360	725	1130	2150
	A «P»	10				37			155	390	800	1250	2300
	tg δ	- 0,11			-	0,121			- 0,69	- 0,084	- 0,103	- 0,106	- 0,06
11	U, B		50	100		150	200	250	290				
	A «3»		10	32,0		85	165	240	370				
	A «P»		9	30,0		88	180	285	450				1 дел. = 1,49·10 ⁻⁶ Дж.
	tg δ		+0,11	+0,0625		- 0,035	- 0,091	- 0,187	- 0,216				
	U, B	10	20	40		60	80	100	130	150	200	250	
	Q «3»	5	10	20		29	39	49	64	74	96	124	

Заев Николай Емельянович, – кандидат технических наук, действительный член Русского Физического Общества.

