

Д. М. КАЗАРНОВСКИЙ, Б. Н. ФЕОФАНОВ
(Ленинград, Рига)

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

При синусоидальном напряжении кривая тока в цепи с сегнетоконденсатором — нелинейным элементом — является обычно симметричной относительно оси абсцисс; ток является несинусоидальным и содержит гармоники только нечетного порядка. Если напряжение на сегнетоконденсаторе содержит переменную и постоянную составляющие, то в кривой тока появляются гармоники четного порядка — вторая, четвертая и т. д. По амплитуде четной гармоники, например по второй, может быть определена постоянная составляющая напряжения.

Исследование кривой тока сегнетоконденсатора при переменном и постоянном напряжениях позволяет выяснить спектральный состав тока. Коэффициент второй гармоники $k_2 = \frac{I_2}{I_1}$ возрастает с повышением напряженности постоянного поля E по линейному закону в большом интервале значений. Расположение и наклон линейного участка кривой зависят от напряженности переменного поля E_{\sim} и от температуры. Влияние температуры может быть скомпенсировано, а наибольшую крутизну наклона зависимости $k_2(E)$ можно обеспечить путем выбора соответствующей напряженности переменного поля (для вариконда ВК2 около 2 кВ/см).

Эффект наложения постоянного поля на переменное можно получить не только путем включения источника постоянного тока, но и в том случае, если на сегнетоэлектрик воздействует электростатическое поле, например атмосферное электрическое поле.

Таким образом, нелинейный сегнетоконденсатор, питаемый переменным напряжением, может быть использован в качестве датчика электростатических полей. Регистрация таких полей представляет значительный интерес при изучении земной атмосферы. Рассматриваемые датчики необходимы во многих отраслях промышленности, где наблюдается появление статических зарядов вследствие трения (в текстильном производстве, типографии, нефтехранилищах и др.).

Известные приборы для измерения напряженности электростатического поля основаны на принципе роторного вольтметра; наличие электродвигателя, значительное потребление энергии, сравнительно большие габариты и вес, а также другие недостатки ограничивают возможность широкого применения таких приборов. Сегнетодатчики, в которых используются современные нелинейные сегнетоэлектрики, свобод-

ны от этих недостатков, и поэтому их исследование является весьма актуальным.

В данной работе приводятся схемы, а также освещаются вопросы теории и расчета предложенных авторами сегнетодатчиков; рассматриваются свойства применяемых в них сегнетоэлектриков.

Схемы. В простейшем случае датчик состоит из металлической пластины — коллектора, на котором концентрируются силовые линии измеряемого поля. К коллектору параллельно присоединены нелинейный сегнетоконденсатор и обычный разделительный конденсатор. Вторые

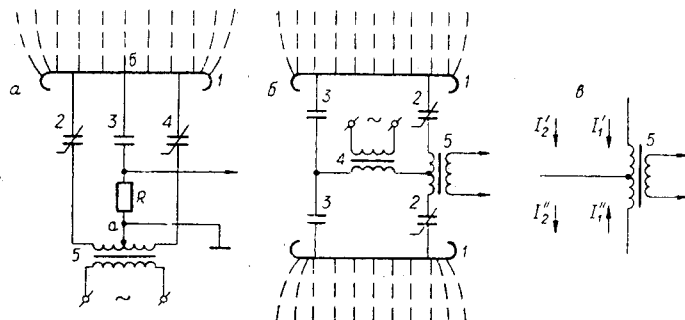


Рис. 1. Схемы сегнетодатчиков:

a — мостовая одноколлекторная: 1 — коллектор; 2, 4 — сегнетоконденсаторы; 3 — разделительный конденсатор; 5 — питающий трансформатор; *b* — мостовая двухколлекторная с питанием в диагонали: 1 — коллекторы; 2 — сегнетоконденсаторы; 3 — разделительные конденсаторы; 4 — питающий трансформатор; 5 — выходной трансформатор; *в* — участок схемы *b* с выходным трансформатором.

выводы конденсаторов подключены ко вторичной обмотке питающего трансформатора с заземленной средней точкой. Использование разделительного конденсатора обеспечивает возможность создания в сегнетоэлектрике постоянной E и переменной E_{\sim} составляющих электрического поля. Если в цепь включить небольшое сопротивление R , то напряжение, снимаемое с него, будет содержать гармонику, пропорциональную напряженности E измеряемого электростатического поля.

Существенным недостатком элементарной схемы датчика является наличие составляющей основной частоты в кривой напряжения, снимаемого с измерительного сопротивления R . В дифференциальной мостовой схеме (рис. 1, *a*) ко вторичной обмотке трансформатора подключены выводы двух сегнетоконденсаторов 2 и 4, а между коллектором и средней точкой обмотки включены разделительный конденсатор 3 и измерительное сопротивление R . Переменное напряжение в диагонали $a-b$ не содержит составляющих нечетного порядка, включая и первого, так как в плечи включены одинаковые сегнетоконденсаторы 2 и 4, а подводимые к ним переменные напряжения равны. Вместе с тем в диагонали $a-b$ происходит сложение токов четных гармоник; среди них наибольшую величину имеет вторая гармоника. Действительно, фазы вторых гармоник тока в сегнетоконденсаторах 2 и 4 сдвинуты на угол π , так как векторы напряженности поля E и E_{\sim} в одном из конденсаторов в данный момент времени имеют одинаковые направления, а в другом — взаимно противоположные. Поэтому токи двойной частоты в сегнетоконденсаторах направлены в одну и ту же сторону (например, в данный момент к коллектору) и в диагонали $a-b$ складываются.

В связи с необходимостью заземления средней точки трансформатора описанная схема одноколлекторного сегнетодатчика может быть использована только у поверхности земли или у металлического про-

водящего корпуса заземленной установки. Исследование электрических полей в свободном пространстве возможно при помощи двухколлекторного сегнетодатчика, в диагональ которого может быть включен либо индикатор, либо источник переменного напряжения (см. рис. 1, б). Если рассмотреть, например, последнюю схему, в которой последовательно с сегнетоконденсаторами 2—2 включена первичная обмотка измерительного трансформатора 5, то можно заметить, что токи основной частоты I_1 и I_1' (как и другие нечетные гармоники) направлены в этой обмотке навстречу друг другу (см. рис. 1, в). Поэтому в кривой напряжения на вторичной обмотке не содержатся составляющие основной частоты и вообще нечетные гармоники. Вместе с тем токи двойной частоты I_2 и I_2' имеют одинаковые направления из-за сдвига составляющих двойной частоты на угол π в сегнетоконденсаторах 2—2. Вследствие этого на вторичной обмотке выходного трансформатора 5 возникает напряжение двойной частоты.

Можно предложить несколько разновидностей двухколлекторных датчиков, отличающихся, например, наличием симметрично расположенных в плечах обмоток питающего или выходного трансформатора, увеличением в целях симметрирования числа разделительных и нелинейных конденсаторов и т. п. Основным принципом построения таких схем является использование фазового сдвига на угол π токов частотой 2ω в ветвях с сегнетоконденсаторами и сложение токов двойной частоты в измерительной ветви.

Теория и расчет. Соотношения между параметрами сегнетодатчика и напряженностью измеряемого внешнего поля E могут быть получены при некоторых допущениях. Кривую диэлектрического гистерезиса заменим кулон-вольтной кривой сегнетоконденсатора, т. е. однозначной зависимостью $q(u)$; потерями в конденсаторах и их проводимостями будем пренебрегать.

Рассмотрим мостовую схему одноколлекторного сегнетодатчика (см. рис. 1, а). Пусть напряженность электростатического поля у коллектора площадью s равна E . Заряд на коллекторе определяется как

$$Q = \epsilon \chi s E,$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость окружающей среды;
 $\chi > 1$ — коэффициент концентрации поля.

Кулон-вольтную кривую сегнетоконденсатора $q(u)$ можно выразить зависимостью $q = A \operatorname{arctg} Bu$, где A и B — постоянные коэффициенты, определяемые при аппроксимации кривой. Напряжение в диагонали равно

$$u_{ab} = \frac{Q}{C + 2C_d} = \frac{Q}{C + 2 \frac{AB}{1 + B^2 u^2}},$$

где

$$C_d = \frac{dq}{du} = \frac{AB}{1 + B^2 u^2} \text{ — динамическая емкость сегнетоконденсатора.}$$

При синусоидальном напряжении $u = U_m \sin \omega t$ имеем

$$u_{ab} = \frac{Q}{C} \frac{1 + B^2 U^2 - B^2 U^2 \cos 2\omega t}{1 + \frac{2AB}{C} + B^2 U^2 - B^2 U^2 \cos 2\omega t}.$$

Введем следующие обозначения:

$$\alpha = 1 + B^2 U^2; \quad \beta = B^2 U^2; \quad \gamma = 1 + 2p + B^2 U^2; \quad p = \frac{AB}{C} = \frac{C_{\text{дmax}}}{C}.$$

Тогда

$$u_{ab} = \frac{Q}{C} \frac{\alpha - \beta \cos 2\omega t}{\gamma - \beta \cos 2\omega t}.$$

Обычно сигнал от сегнетодатчика подводится к резонансному усилителю, настроенному на частоту второй гармоники. Найдем напряжение удвоенной частоты на входе усилителя. Напряжение u_{ab} можно представить в виде ряда Фурье и найти коэффициенты, определяющие амплитуду второй гармоники (следует учесть, что основная гармоника в диагонали имеет частоту 2ω):

$$U_{2ma} = \frac{Q}{\pi C} \int_0^{2\pi} \frac{\alpha - \beta \cos 2\omega t}{\gamma - \beta \cos 2\omega t} \cos 2\omega t d(2\omega t);$$

$$U_{2mb} = \frac{Q}{\pi C} \int_0^{2\pi} \frac{\alpha - \beta \cos 2\omega t}{\gamma - \beta \cos 2\omega t} \sin 2\omega t d(2\omega t).$$

Интегрирование указанных выражений дает

$$U_{2m} = \sqrt{U_{2ma}^2 + U_{2mb}^2} = \frac{2Q}{\beta C} (\gamma - \alpha) \left(\frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - \beta^2}} - 1 \right).$$

Напряжение второй гармоники (амплитуда), подводимое к усилителю, составляет

$$U_{\text{вх}} = U_{2m} \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(2\omega C)^2}}}.$$

С учетом равенств

$$\vartheta = R 2\omega C; \quad 2p = \gamma - \alpha; \quad C = \frac{AB}{p}$$

имеем

$$U_{\text{вх}} = \frac{4 \varepsilon \chi \vartheta p^2 s E}{AB \beta \sqrt{\vartheta^2 + 1}} \left(\frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - \beta^2}} - 1 \right).$$

Из данного выражения следует, что напряжение $U_{\text{вх}}$ при $E=1$, т. е. чувствительность сегнетодатчика, возрастает с увеличением эффективной площади коллектора $s\chi$ и с уменьшением емкости сегнетоконденсатора (коэффициент A). Очевидно, повышение нелинейности конденсатора (коэффициент B) также будет сопровождаться увеличением напряжения $U_{\text{вх}}$. Зависимости напряжения $U_{\text{вх}}$ от безразмерных параметров ϑ и p , построенные для единичной напряженности измеряемого поля $E=1$ в/см, показывают, что с их ростом напряжение $U_{\text{вх}}$ увеличивается; однако это увеличение становится малозаметным при опреде-

ленных значениях параметров. Например, для ВК2 рост $U_{вх}$ почти прекращается при $\vartheta > 3-5$ (рис. 2, а) и при $p > 60-80$ (см. рис. 2, б).

При расчете сегнетодатчика устанавливаем величину напряженности переменного поля E — отвечающей наибольшей крутизне наклона кривой $k_2(E)$ и соответственно переменное напряжение возбуждения U . Зная U и коэффициенты A и B , определяемые при аппроксимации

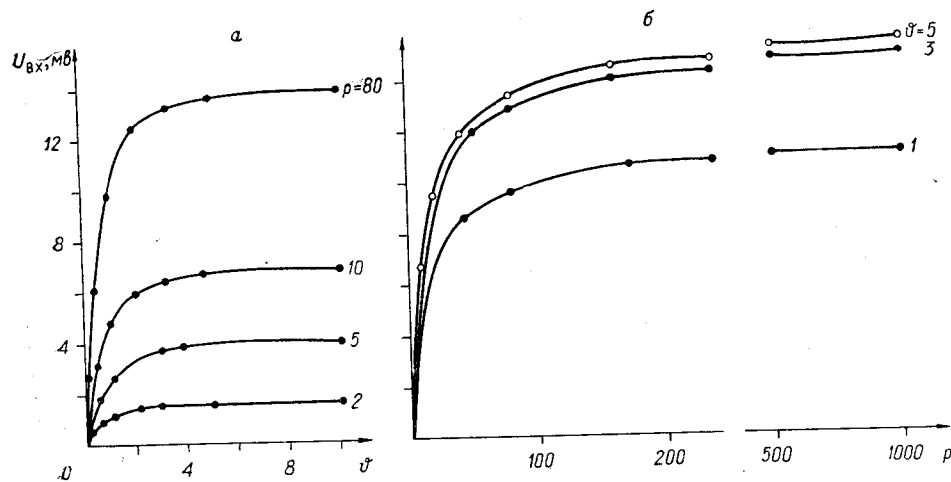


Рис. 2. Напряжение второй гармоники на входе усилителя $U_{вх}$ (амплитуда) при единичной напряженности электростатического поля $E=1$ в/см:

а — в функции параметра $\vartheta=2\omega CR$; б — в функции параметра $p = \frac{AB}{C}$; характеристики и режим работы датчика: $A = 12 \cdot 10^{-7}$ к; $B = 0,0166$ л/в; $\omega = 2 \cdot 10^6 \pi$ 1/сек; $S = 5 \cdot 10^2$ см²; $U = 200$ в;
 $\varepsilon = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}$ ф/см.

кулон-вольтной кривой сегнетоконденсатора, находим β . Выбрав согласно сказанному ϑ и p (см. рис. 2), получим γ , и, задавшись по конструктивным условиям эффективной площадью χS , вычислим по формуле для $U_{вх}$ величину $U_{вх}$ для минимального ожидаемого значения измеряемого поля E .

Емкость разделительного конденсатора составляет

$$C = \frac{AB}{P}.$$

При этом

$$R = \frac{\vartheta}{2\omega C} = \frac{\vartheta p}{2\omega AB}.$$

Нелинейный сегнетоконденсатор. Испытания сегнетодатчиков на варикондах ВК2 подтвердили справедливость расчета с погрешностью до 12% и показали, что влияние гистерезиса и старения сегнетокерамики пренебрежимо мало. Из-за наличия заметной электропроводности конденсаторов измерения следует проводить кратковременно, экранируя датчик на время паузы; температура окружающей среды при использовании ВК2 не должна отклоняться от нормальной («тарировочной») более чем на $\pm 5^\circ \text{C}$.

нелинейности, в особенности если точка Кюри близка к рабочей температуре.

Анализ теоретических и экспериментальных результатов исследования позволяет выдвинуть следующие требования к сегнетоэлектрикам, предназначенным для датчиков поля:

1) сочетание невысокой диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика ϵ_c с большой нелинейностью $\frac{d\epsilon_c}{dE}$; 2) наибольшая крутизна наклона зависимости $k_2(E)$; 3) низкое значение удельной объемной γ_v и поверхностной γ_s электропроводности и потерь $\text{tg } \delta$ (при частоте 10^3 — 10^4 гц) сегнетоэлектрика; 4) наличие точки Кюри, значительно удаленной от рабочей температуры сегнетоконденсатора.

Прогресс в области развития монокристаллов твердых растворов и поликристаллических сегнетоэлектриков позволяет ожидать появления материалов, все больше удовлетворяющих указанным требованиям.

*Поступила в редакцию
19 мая 1966 г.,
окончательный вариант —
17 сентября 1966 г.*