

ратура плазменного потока существенно зависит от материала внедрения, который подается в плазменный поток. На дистанции обработки 40 мм осевая температура составляет 4700 К при работе плазматрона с насыщенным раствором  $\text{CuSO}_4$ , 4900 К – с раствором  $\text{CoCl}_2$ , 5000 К – в случае подачи в плазменный поток воды. Минимальная температура на данной дистанции обработки составляет 3500 К при работе исследуемого плазматрона без использования материала внедрения (рис. 2, з). Анализируя полученные зависимости можно определить оптимальные дистанцию обработки и выдержку времени, обеспечивающие получение высококачественных покрытий при атмосферном давлении без деформации и разрушения стекла.

Предложенный электротехнический комплекс может использоваться для измерения температур плазменных потоков электродуговых плазматронов при поверхностной модификации стекла. На основании полученных в ходе экспериментальных исследований температурных зависимостей можно определить электрическую мощность дуги, тепловой поток через единицу длины канала,

потери энергии через стенки дуговой камеры, тепловой к. п. д. плазматрона и другие параметры, необходимые для обеспечения устойчивой работы электротехнического комплекса для нанесения покрытий на стекло при атмосферном давлении.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРА

1. Магунов, А. Н. Спектральная пирометрия / А. Н. Магунов // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – №4. – С. 5–28.
2. Жуков, М. Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазматроны) / Жуков М. Ф., Смоляков В. Я., Урюков Б. А. – М.: Наука, 1973. – 232 с.
3. Физика и техника низкотемпературной плазмы / [Дресвин С. В., Донской А. В., Гольдфарб В. М., Клубникин В. С.]; под общ. ред. С. В. Дресвина. – М.: Атомиздат, 1972. – 352 с.
4. Свойства низкотемпературной плазмы и методы ее диагностики / [под ред. М. Ф. Жукова]. – Новосибирск: Наука, 1977. – 295 с.

*Стаття надійшла до редакції 04.10.2012.*

**І. В. Авдєєв, О. А. Шрам**  
Електротехнічний комплекс для вимірювання температур плазмових потоків при поверхневій модифікації скла

*У статті розглянуто електротехнічний комплекс для вимірювання температур робочих потоків низькотемпературної плазми на основі нестационарного методу динамічної термопари.*

**Ключові слова:** низькотемпературна плазма, плазматрон, термопара, вимірювання температури.

**I. Avdeev, A. Shrum**  
Electrotechnical complex for temperature measurement plasma fluxes in the surface modification of the glass

*The electrotechnical complex for temperature measurement fluxes of the low-temperature plasma based on the transient method of dynamic thermocouple is considered in the article.*

**Key words:** low-temperature plasma, plasmatron, thermocouple, temperature measurement.

УДК 621.384.5

И. Г. Игнатьев

*Канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Института прикладной физики Национальной Академии Наук Украины*

## РАСЧЕТ ИНДУКТОРА ЗАРЯДНОГО УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕННО-ЕМКОСТНОГО ГЕНЕРАТОРА

*Представлены результаты сравнительного анализа ртутного, пружинного конусного и пружинного сферического индукторов зарядного устройства высоковольтного генератора переменного-емкостного типа.*

**Ключевые слова:** высоковольтный генератор, оптимизация, индуктор.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что существует два типа электростатических генераторов (ЭГ) высокого напряжения – электропреобразовательные и электромеханические [1–3]. В электропреобразовательных генераторах применяют

ся преобразователи и коммутирующие схемы, усиливающие напряжение (генераторы импульсного напряжения, Кокрофта-Уолтона и др.). Механические генераторы (например – машины Ван де Граафа, Фелиси, Вимшурста), создают высокое напряжение путем механического перемещения заряженных частиц и сохранения

этих частиц на высоковольтном электроде (терминале), например металлической сфере или конденсаторе.

Каждый тип ЭГ имеет собственные преимущества и недостатки, однако, есть один общий недостаток – относительно большие габариты, а также большой вес. Вместе с тем, в последние годы увеличивается спрос на генераторы высоких напряжений, которые имеют малые габариты и небольшой вес при высокой надежности.

В статье [4] рассматривались конструкция и результаты испытаний малогабаритного переменного емкостного ЭГ на напряжение 140 кВ, в индукторе зарядного устройства которого используются капли ртути. Возможные области применения данного ЭГ достаточно разнообразны: испытательные высоковольтные установки, ускорители заряженных частиц, устройства для снятия статического электричества, ионизаторы и т. д.

Автором настоящей работы была предложена альтернатива ртутному зарядному устройству – пружинное устройство [5]. Такое изменение конструкции позволяет повысить экологическую безопасность, надежность и увеличить рабочее напряжение установки.

Цель данной работы – путем численного моделирования провести сравнительный анализ эффективности пружинных (сферического и конусного) и ртутного зарядных устройств.

Достижение поставленной цели позволит оптимизировать конструкцию генератора и выбрать приемлемую для конкретной задачи технологию его изготовления.

### 1. НЕДОСТАТКИ ПЕРЕМЕННО-ЕМКОСТНОГО ЭГ С РТУТНЫМ ИНДУКТОРОМ

Работа всех переменного емкостных ЭГ основана на законе сохранения заряда: при уменьшении емкости между двумя заряженными телами (например, при увеличении расстояния между ними), разность потенциалов увеличивается в  $K_0$  раз

$$K_0 = U_2 / U_1 = C_1 / C_2, \tag{1}$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – начальная и конечная разности потенциалов между телами;  $C_1$  и  $C_2$  – начальная и конечная емкости системы. Коэффициент  $K_0$  далее будем называть коэффициентом увеличения напряжения ЭГ, а устройство, повышающее разность потенциалов – индуктором.

В работе [4] в качестве индуктора предложена система из двух капелек ртути, разделенных пластиной с высокой (порядка  $10^3 \div 10^4$ ) относительной диэлектрической проницаемостью (рис. 1). При помощи электромагнитного пресса индуктора (на рисунке не показан) капельки сплющиваются, заряжаются до разности потенциалов  $U_1$ , образуется плоский конденсатор емкостью  $C_1$  (рис. 1, а). Затем пресс и источник напряжения отключаются, капельки под действием сил поверхностного натяжения приобретают форму, близкую к шарообразной (рис. 1, б), благодаря чему емкость уменьшается до величины  $C_2 < C_1$  а напряжение увеличивается до  $U_2 > U_1$ .

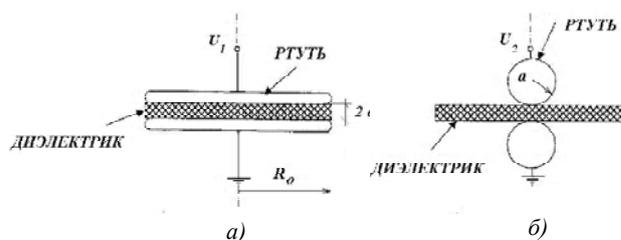


Рис. 1. Принцип действия переменного емкостного генератора с ртутным индуктором; а – индуктор при действии электромагнитного пресса, б – индуктор при отключении электромагнитного пресса

Оценим предельные возможности ртутного индуктора. Согласно [4] для шарообразной капли

$$K_0 = 0,11 \cdot \epsilon_r \cdot (1 + a/d) \cdot \left(\frac{R_0}{a}\right)^2, \tag{2}$$

где  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала пластины,  $a$  – радиус неискаженной капли;  $2d$  – толщина пластины;  $R_0$  – радиус сплюсненной капли (рис. 1).

Из (2) следует, что усиление напряжения ЭГ пропорционально  $\epsilon_r$  и  $\left(\frac{R_0}{a}\right)^2$ . Но известно [4], что при пятикратном сжатии капля распадается, то есть существует

ограничение  $\left(\frac{R_0}{a}\right)^2 < 25$ . Перспектив увеличения  $K_0$  за

счет отношения  $a/d$  нет, так как  $a/d \sim 1$  (капля под действием гравитации теряет сферическую форму, формула (2) не работает, и согласно (1)  $C_1 \rightarrow C_2$  и  $K_0 \rightarrow 1$ ). Тогда при  $2d = 3$  мм,  $a = 2,5$  мм (максимально возможный радиус капли [3]) максимально достижимый коэффициент увеличения напряжения  $K_0 = 7,3 \epsilon_r$ .

Таким образом, приведенный коэффициент увеличения напряжения  $K$  (он зависит только от геометрических параметров индуктора) ограничен величиной

$$K = \frac{K_0}{\epsilon_r} < 7,3,$$

то есть повышение рабочего напряжения ртутного генератора возможно лишь за счет увеличения  $\epsilon_r$ .

Кроме того:

- при работе ртутного индуктора неизбежны микро-разряды и пробой между каплями и элементами высоковольтной структуры, приводящие к испарению и даже взрыву ртути;

- система имеет низкую надежность из-за смещения капелек вследствие вибраций.

Таким образом, область применения и перспективы улучшения характеристик ЭГ с ртутным индуктором ограничены существующей технологией изготовления устройства, существованием предела увеличения  $K$  и экологической опасностью.

Рассмотрим альтернативный вариант зарядного устройства ЭГ, состоящий в замене каплей ртути пружинами сжатия.

## 2 ПЕРЕМЕННО-ЕМКОСТНЫЙ ЭГ С ПРУЖИННЫМ ИНДУКТОРОМ

Принцип действия зарядного устройства с использованием в качестве индуктора пружин сжатия (рис. 2) аналогичен представленному выше на рис. 1 ртутному варианту. Подробно работа данного генератора описана в [5].

Далее сравниваются возможности индукторов двух типов – сферического (рис. 2, а) и конусного (рис. 2, б).

Для расчета зависимостей  $K$  от геометрических параметров индуктора применялся численный код Opera 3D / Toska (<http://www.vectorfields.com>), реализующий метод конечных элементов и позволяющий вычислять электрические емкости систем электродов. Алгоритм расчета состоит из следующих этапов:

1. На поверхности электродов задаются граничные условия первого рода:

$$U_2 = 1 \text{ В}, U_1 = 1 \text{ В}$$

и второго рода (равенство производных нормальных составляющих векторов электрического смещения) на границах воздуха (В) и диэлектрика (Д)

$$\frac{\partial U_{\text{В}}}{\partial n} = \frac{\partial U_{\text{Д}}}{\partial n} \varepsilon_r.$$

2. Выбирается расчетная область для вычисления модуля напряженности электрического поля  $E$ . Как рекомендуется в инструкции пользователя программы Opera 3D / Toska для обеспечения точности расчета электрической емкости порядка 1 %, необходимо, чтобы размеры расчетной области превышали габариты системы (в нашем случае это параметры  $a$  и  $R_0$ ) в 3–5 раз. Была выбрана цилиндрическая расчетная область  $V$ , ограниченная по радиусу и высоте системы величиной  $(2a) \times 5 = 100 \times 5 = 500$  мм (табл. 1, пружинный сферический индуктор). Выбор сферического индуктора для определения размеров расчетной области связан с тем, что, из всех рассматриваемых, он имеет максимальные габариты. Количество элементов разбиения области составляло до  $10^9$ . Расчеты показали, что дальнейшее разбиение не приво-

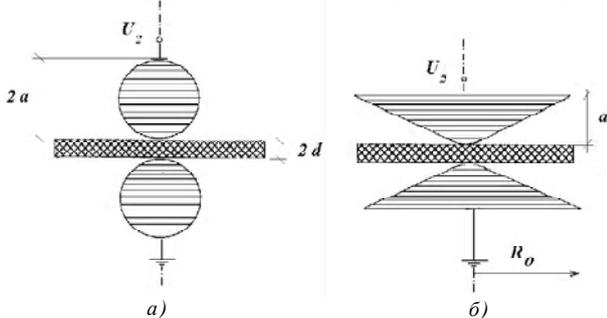


Рис. 2. Параметры переменного-емкостного генератора с пружинным индуктором: а – сферический индуктор; б – конусный индуктор

Таблица 1.

Вид индуктора	Габариты индуктора
Ртутный	$R_0 \times 2a = 12 \times 5$ мм
Пружинный сферический	$2a \times 2a = 100 \times 100$ мм
Пружинный конусный	$R_0 \times a = 40 \times 55$ мм

дит к повышению точности определения электрической емкости.

3. Методом конечных элементов решается уравнение Лапласа

$$\Delta U = 0.$$

4. Расчет электрической емкости. В коде Opera 3D / Toska, он основан на нахождении энергии электростатического поля по всей расчетной области  $V$ , (включая пластину с абсолютной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ ) при разности потенциалов между электродами 1 В

$$C_2 = \iiint_V \varepsilon E^2 dV.$$

При расчете, как и в [4] принималось  $\varepsilon_r = 1500, 2d = 3$  мм.

5. Расчет приведенных коэффициентов увеличения по выражению (1). При этом  $C_1$  вычислялась как емкость плоского конденсатора.

В качестве теста использовались результаты расчета  $K$  для ртутного индуктора, полученные в работе [4]. Расхождения результатов не превышали 5 %.

Зависимости приведенных коэффициентов увеличения напряжения от геометрических параметров, описанных выше трех типов индукторов, представлены на рис. 3 и рис. 4.

Отметим, что, согласно рис. 4, для конусного индуктора при  $R_0 > (1 \div 2) a$  значение  $K$  достигает насыщения и его повышение возможно только за счет увеличения  $a$ . Это связано с тем, что при увеличении радиуса конуса происходит увеличение  $C_2$  (1). По той же причине, в случае шарового сферического индуктора (рис. 3) при  $a \gg 2d$  так же имеет место «насыщение»  $K$ .

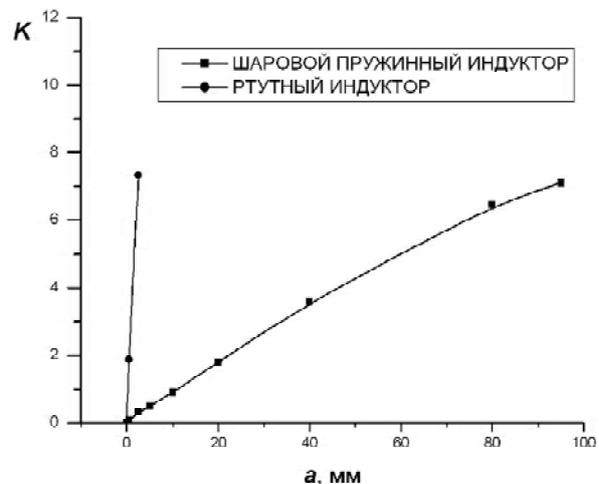


Рис. 3. Зависимости приведенного коэффициента увеличения напряжения от радиуса индукторов

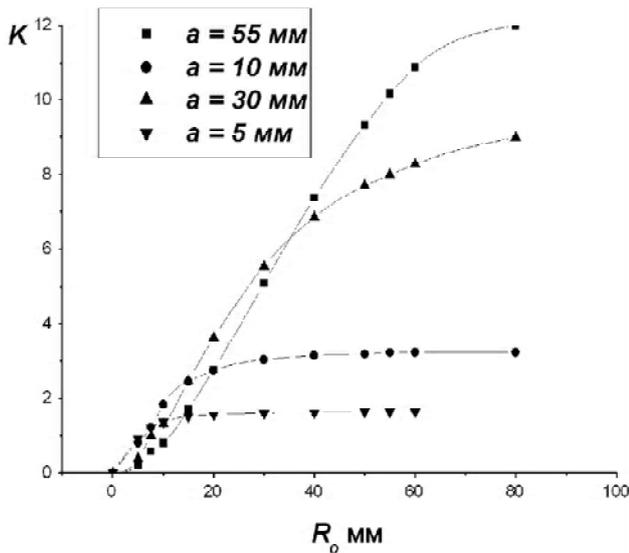


Рис. 4. Зависимости приведенного коэффициента увеличения напряжения от радиуса конического пружинного индуктора

В табл. 1 представлены габариты индукторов, соответствующие максимально возможному для ртутного варианта ( $K=7,3$ ).

### ВЫВОДЫ

Численный анализ показал, что для достижения одного и того же коэффициента увеличения напряжения пружинный конусный индуктор имеет в несколько раз меньшие габариты по сравнению со сферическим индуктором (табл. 1).

Увеличение в несколько раз габаритов пружинных индукторов по сравнению с ртутным индуктором в большинстве случаев несущественно и компенсируется экологической безопасностью и надежностью.

**І. Г. Ігнат'єв**

**Розрахунок індуктору зарядного пристрою електростатичного змінно-ємкісного генератора**

*Представлені результати порівнювального аналізу ртутного, пружинного конусного та пружинного сферичного індукторів зарядного пристрою високовольтного генератора змінно-ємкісного типу.*

**Ключові слова:** високовольтний генератор, оптимізація, індуктор.

**I. G. Ignat'ev**

**Calculation of charging device inductor of electrostatic varying-capacitance generator**

*Results of calculation of charging device inductor of high-voltage generators are presented. Three kinds of inductors (mercurial, spring, cone and spring-spherical ones) are observed.*

**Key words:** high-voltage generator; optimization, inductor.

Но главное, появляется возможность практически неограниченного повышения напряжения за счет увеличения размеров пружин. Ртутный же индуктор не имеет перспектив увеличения приведенного коэффициента увеличения напряжения (он не превосходит величины 7,3).

Окончательный выбор типа индуктора зависит от назначения ЭГ, условий эксплуатации и технологических возможностей.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пичугина, М. Т. Высоковольтная электротехника : учебное пособие / М. Т. Пичугина. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 120 с.
2. Wadhwa, C. L. High Voltage Engineering (second edition)/ Published by New Age International (P) Ltd., Publishers. – 2007. – 312 p.
3. Бейер, М. Техника высоких напряжений: Теоретические и практические основы применения / [Бейер М., Бек В., Меллер К. и др.] ; под ред. В. П. Ларионова; пер. с нем. – М. : Энергоатомиздат. – 1989. – 555 с.
4. Bakhout Ezzat, G. Novel miniature electrostatic generator // Review of scientific instruments. – 2008. – No. 79 – P. 015103.
5. Ігнат'єв, І. Г. Патент на винахід № 95530 Україна, МПК H02N 1 / 08 (2006.01). Електростатичний генератор / І. Г. Ігнат'єв, В. І. Мирошніченко / заявник та власник Інститут прикладної фізики НАН України. – № а2009 13117; заявл. 16.12.2009; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15. – 4 с.

*Стаття надійшла до редакції 22.05.2012.  
Після доробки 02.10.2012.*