

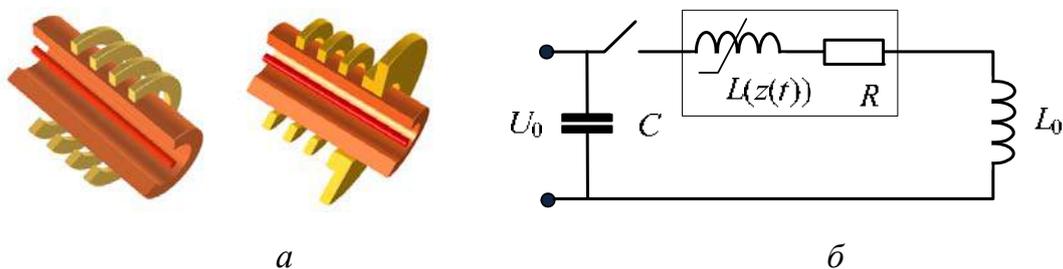
# ОПТИМИЗАЦИЯ ИНДУКТИВНОСТИ ИНДУКТОРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ

*А.А. Будько, О.В. Васильева*

*Томский политехнический университет, г. Томск  
Научный руководитель: Васильева О.В., к.т.н., доцент кафедры  
электрических сетей и электротехники ТПУ*

В работе описывается оптимизация индуктивности индуктора на основе экспериментальных данных для диагностики коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ). Данные для исследования были получены экспериментальным путем для двух различных моделей КМПУ двойного назначения. Практическое использование ускорителя с одной стороны заключается в нанесении различных функциональных покрытий и получении ультрадисперсных порошков металлов, а с другой стороны как устройство для ускорения вылета плазменной струи [1].

На рис. 1, *а* представлены используемые упрощенные модели данного КМПУ с электротехнической схемой замещения (рис. 1, *б*). Батарея конденсаторов емкостями  $C = 30 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$ ,  $C = 12 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$  для двух различных моделей, заряжается до напряжения  $U_0 = 3 \text{ кВ}$ , сопротивление цепи  $R = 10^{-3} \text{ Ом}$ .



*Рис. 1. Упрощенные модели КМПУ, отличающиеся емкостью и формой соленоида: а – сечение плазменного ускорителя; б – схема замещения*

Новизна методики заключается в том, что сложные процессы, протекающие в КМПУ, заменяются расчетом электротехнической схемы замещения (рис. 1, *б*) известными методами. Индуктивность индукторов  $L_0$  рассчитана на основе расчета векторного магнитного потенциала с последующим расчетом энергии магнитостатического поля [2, 3] и равна  $L_0 = 8,764 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$ ,  $L_0 = 1,722 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$  соответственно для двух моделей КМПУ. Индуктивность плазменного жгута  $L'$  записана в виде линейной функции координаты распространения [3] и для двух моделей равна  $L' = 4,6 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$ .

### Влияние индуктивности индуктора

Рассмотрим кинетическую энергию  $W_{кин}$  двух моделей КМПУ (рис. 1, а), которая изображена на рис. 2.

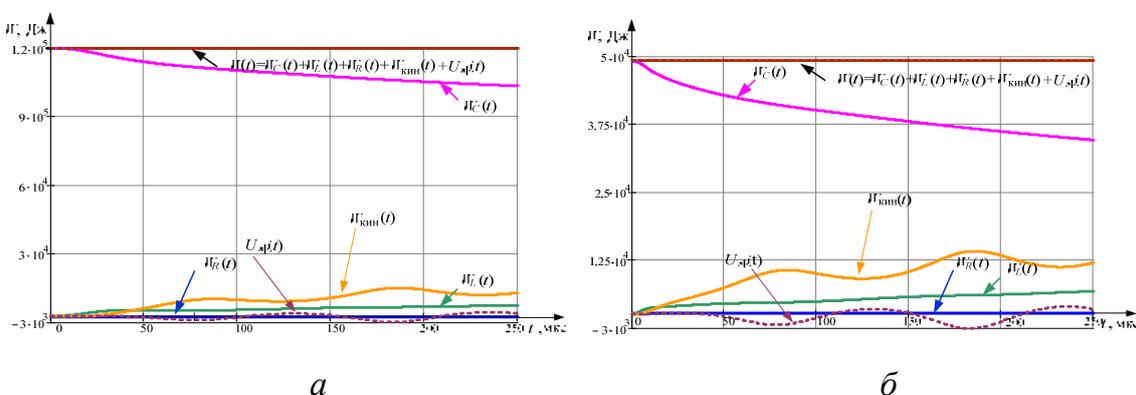


Рис. 2. Кинетическая энергия двух моделей в сравнении:

а – модель № 1 –  $W_{кин} \cdot 100 \% / W_0 = 8,3 \%$ ; б – модель № 2 –  $W_{кин} \cdot 100 \% / W_0 = 20,2 \%$

Полученные зависимости наглядно иллюстрируют, что в качестве ускорителя плазменного сгустка целесообразно применять модель № 2, так как вклад кинетической энергии значительно выше, нежели у модели № 1. Это обусловлено тем, что индуктивность индуктора данной модели № 2 значительно ниже. После анализа исходных энергий системы двух моделей КМПУ рассмотрим влияние индуктивности индуктора на кинетическую энергию, представленное на рисунке ниже (рис. 3).

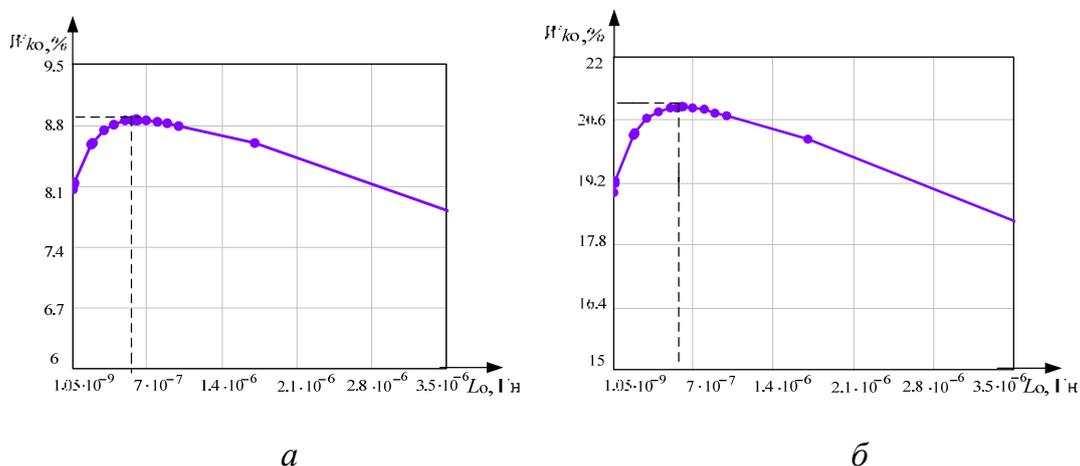


Рис. 3. Влияние индуктивности индуктора КМПУ на кинетическую энергию в сравнении, где  $W_{k0} = W_{кин} \cdot 100 \% / W_0$ ,  $L_{0min} = 1,05 \cdot 10^{-9}$  Гн:

а – модель № 1; б – модель № 2

Оптимальное значение индуктивности индуктора для кинетической энергии двух моделей КМПУ равно  $L_0 = 6 \cdot 10^{-7}$  Гн. При этом значении

энергия достигает максимального значения:  $W_{\text{кин}} = 9\%$  и  $W_{\text{кин}} = 21\%$  соответственно. Увеличение кинетической энергии происходит за счет преобладания продольной составляющей скорости частиц в плазменном сгустке, что увеличивает скорость вылета (рис. 6, б).

Снижение кинетической энергии в диапазоне индуктивностей  $L_0 = (1,05 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-7})$  Гн приводит к неустойчивости плазмы, где дисбаланс энергии [3] за счет высокочастотных составляющих тока проявляется при  $L_{0\text{min}} = 1,05 \cdot 10^{-9}$  Гн.

В диапазоне индуктивностей индуктора ускорительного канала  $L_0 = (6 \cdot 10^{-7} - 3,5 \cdot 10^{-6})$  Гн уменьшается кинетическая энергия за счет преобладания поперечной составляющей скорости заряженных частиц, что в свою очередь уже положительно влияет на эрозию металла количеством ультрадисперсных порошков (рис. 4, а).

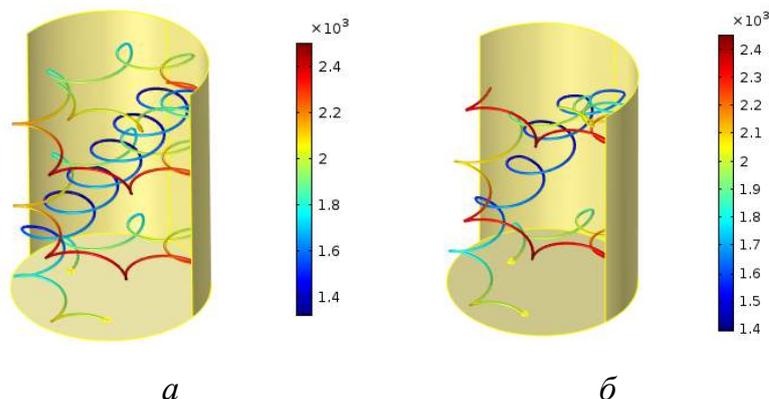


Рис. 4. Вид пространственной траектории заряженных частиц: а – преобладание поперечной составляющей скорости частиц; б – преобладание продольной составляющей скорости частиц

Для ограничения траектории движения заряженных частиц в пределах ствола введена потенциальная функция  $U(x, y)$  – «потенциальная яма», имеющая следующий вид:

$$U(x, y) = \beta \left[ 1 - e^{-\rho(x, y)^{48} \alpha} \right].$$

При моделировании потенциальной ямы учитывалось, что:  $\beta = 10^4$ ,  $\alpha = 10^{-60}$ .

#### Моделирование потенциальной ямы в COMSOL Multiphysics

При моделировании потенциальной ямы применялась среда COMSOL Multiphysics, позволяющая наглядно отобразить ограничение разлета частиц плазмы в пространстве и показать преимущества попе-

речной и продольной составляющих скоростей заряженных частиц в плазменном сгустке (рис. 4).

Используя потенциальную функцию и уравнение динамики заряженных частиц в электромагнитных полях в векторной форме, получим:

$$m \ddot{\mathbf{r}} = e\mathbf{B} \times \mathbf{v} + e\mathbf{E} - \nabla U(\mathbf{r}), \quad \mathbf{B} = \text{rot}(\mathbf{A}) = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{pmatrix}.$$

Для повышения точности расчета полученная система дифференциальных уравнений второго порядка предварительно была сведена к системе дифференциальных уравнений первого порядка и решена методом Рунге–Кутты [3]. При заданной конфигурации электромагнитного поля наблюдаем спиралевидное движение частиц.

Соприкасаясь со стенками, частицы вызывают эрозию, в результате которой изменяется масса плазмы.

#### *Результаты*

Представлена оптимизация индуктивности индуктора на основе экспериментальных данных для диагностики магнитоплазменного ускорителя, которая определяет практическое использование ускорителя двойного назначения за счет изменения величины индуктивности индуктора.

Для повышения качества исследуемого устройства сравнительные численные эксперименты показали:

- для повышения кинетической энергии необходимо у модели № 1 уменьшить, а у модели № 2 увеличить индуктивность индуктора;
- для повышения эрозии металла и получения ультрадисперсных порошков целесообразно использовать КМПУ модели №1.

#### **Список информационных источников**

1. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Электроэрозийная наработка материала в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе для нанесения покрытий // Электротехника. – 2005. – № 6. – С. 25–33.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т. 2: Теория поля. – М.: Наука, 1992. – 533 с.
3. Исаев Ю.Н., Васильева О.В. Методы расчета электромагнитных полей. Практика использования MathCAD, COMSOL Multiphysics. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 162 с.