

2000 г. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию «Программно-аппаратные средства для оценки коммутационной напряженности коллекторных электрических машин» в ТПУ. Заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы» ТПУ.

**Васильев Алексей Сергеевич** окончил магистратуру ЭЛТИ ТПУ в 2009 г. Аспирант, ассистент кафедры «Электроэнергетические системы» ТПУ.

**Гусев Александр Сергеевич** окончил электроэнергетический факультет ТПИ в 1973 г. В 2008 г. защитил докторскую диссертацию «Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем» в ТПУ. Профессор кафедры «Электроэнергетические системы» ТПУ.

\* \* \*

## Влияние индуктивности индуктора коаксиального магнитоплазменного ускорителя на кинетическую энергию системы

ИСАЕВ Ю.Н., ВАСИЛЬЕВА О.В., КОЛЧАНОВА В.А.

Анализируется влияние индуктивности индуктора коаксиального магнитоплазменного ускорителя на вклад кинетической энергии в исходную энергию системы для двух различных моделей ускорителя. Исследование осуществляется на примере модельных коаксиальных магнитоплазменных ускорителей, используемых на практике.

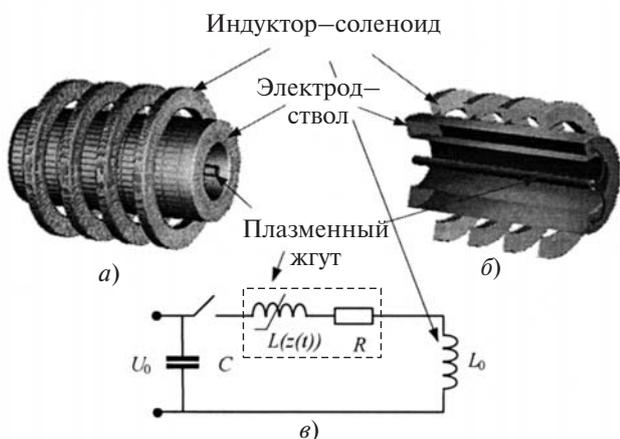
**Ключевые слова:** магнитоплазменный ускоритель, индуктивность индуктора, кинетическая энергия, баланс энергии, математическое моделирование

Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель (КМПУ) является электроэрозийным ускорителем, так как рабочий материал нарабатывается электроэрозийным путем с поверхности ускорительного канала. На рис. 1, 2 представлены упрощенные модели КМПУ. Для описания процессов, происходящих в КМПУ, представим их как электромеханические устройства с емкостью  $C$  и напряжением  $U_0$ ,

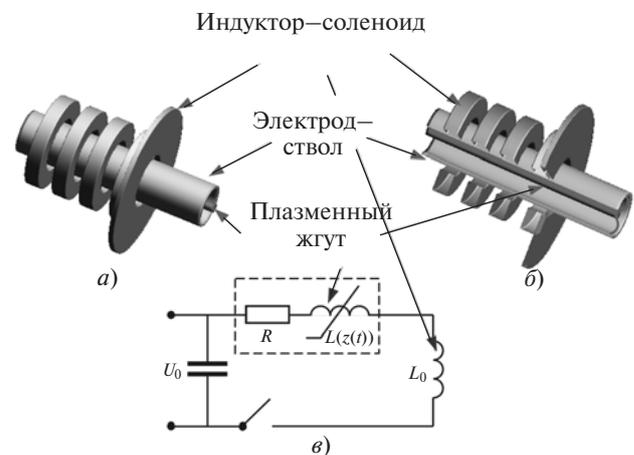
The effect the inductance of the inductor of a coaxial magnetoplasma accelerator has on the contribution of kinetic energy in the initial energy of the system is analyzed for two different accelerator models. The study is carried out taking as an example model coaxial magnetoplasma accelerators, devices used for practical applications.

**Key words:** magnetoplasma accelerator, inductor's inductance, kinetic energy, energy balance, mathematical simulation

полагая, что масса и сопротивление плазмы постоянны. Сгусток плазмы представлен недеформируемой проводящей перемычкой, ускоряемой силами магнитного давления собственных токов, протекающих через перемычку. Будем считать, что плазменный сгусток локализован и устойчив и ведет себя в процессе ускорения как единое целое. Индуктивность индуктора  $L_0$  определена на основе



**Рис. 1.** Упрощенная модель КМПУ №1:  $C = 30 \times 10^{-3}$  Ф;  $L_0 = 8,764 \times 10^{-7}$  Гн;  $L\phi = 4,6 \times 10^{-7}$  Гн;  $U_0 = 3$  кВ



**Рис. 2.** Упрощенная модель КМПУ №2:  $C = 12 \times 10^{-3}$  Ф;  $L_0 = 1,722 \times 10^{-7}$  Гн;  $L\phi = 4,6 \times 10^{-7}$  Гн;  $U_0 = 3$  кВ

расчета энергии магнитостатического поля [3, 4]. Индуктивность плазменного жгута  $L\phi$  представлена в виде линейной функции координаты распространения, где удельная индуктивность (на единицу длины) была рассчитана на основе [5, 6].

На рис. 3 приведены значения вклада кинетической энергии  $W_{кин}$  в исходную энергию системы  $W_0$  для двух моделей.

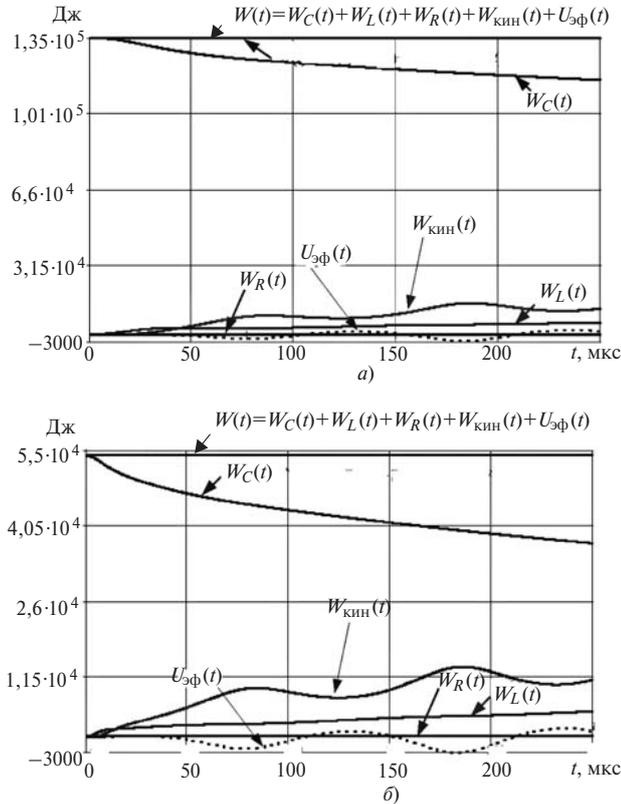


Рис. 3. Сравнение вкладов кинетической энергии в исходную энергию системы: а – для модели № 1  $\frac{W_{кин}}{W_0} \times 100\% = 8,8\%$ ; б – для модели № 2  $\frac{W_{кин}}{W_0} \times 100\% = 20,2\%$

Из анализа графиков рис. 3 можно сделать следующий вывод. С увеличением индуктивности индуктора увеличивается поперечная составляющая скорости, что положительно влияет на эрозию металлов и получение ультрадисперсных порошков, уменьшается скорость изменения тока, стабилизируются ток и плазма в ускорительном канале. Уменьшение индуктивности индуктора приводит к увеличению кинетической энергии системы и тем самым к увеличению скорости плазменного сгустка.

Рис. 4 иллюстрирует влияние индуктивности индуктора КМПУ на вклад кинетической энергии в исходную энергию системы. Видно, что оптимальное значение индуктивности индуктора для обеих моделей КМПУ равно  $L_0 = 6 \times 10^{-7}$  Гн. При этом значении кинетическая энергия для модели

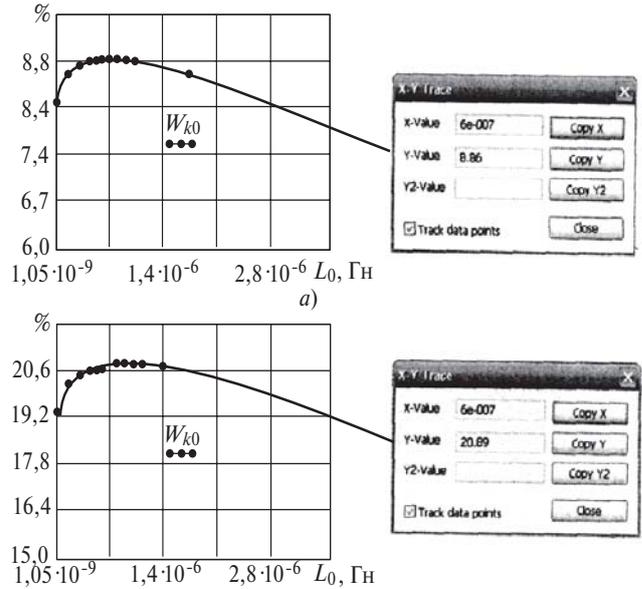


Рис. 4. Сравнение влияния индуктивности индуктора КМПУ на вклад кинетической энергии в исходную энергию системы: а и б – модели № 1 и № 2

КМПУ №1 достигает максимального значения  $W_{кин} = 8,86\%$ , а для модели №2 –  $W_{кин} = 20,89\%$ . Снижение кинетической энергии в диапазоне индуктивности  $L_0 = 1,05 \times 10^{-9}, 6 \times 10^{-7}$  Гн обусловлено тем, что при значительном уменьшении индуктивности индуктора возрастают скорость изменения, неустойчивость плазмы. Высокочастотные составляющие тока проявляются при индуктивности меньше минимально допустимого значения  $L_{0min} = 1,05 \times 10^{-9}$  Гн. Значение минимальной индуктивности определялось из условия отсутствия высокочастотных составляющих тока при расчете баланса энергии вариационным методом.

Рис. 5 характеризует дисбаланс энергии, при котором проявляются высокочастотные составляющие тока; здесь обозначено:  $W(t)$  – общая энергия системы;  $W_C(t)$  – электрическая энергия конденсатора;  $W_L(t)$  – магнитная энергия катушки;  $W_R(t)$  – потери энергии;  $W_{кин}(t)$  – кинетическая энергия;  $U_{эф}(t)$  – эффективная потенциальная энергия [5].

В таблице приведены экспериментальные и расчетные данные.

Параметр	Значения параметров	
	экспериментальные	теоретические
Индуктивность $L_0$ , Гн	$(2, 6) \times 10^{-7}$	$1,72 \times 10^{-7}$
Скорость $v$ , м/с	4, 10	6
Ток $I$ , кА	100, 150	90
Пространственная длительность процесса $x$ , мм	240	250
Ускорение $a$ , км/с <sup>2</sup>	$2 \times 10^5$	$1,8 \times 10^5$

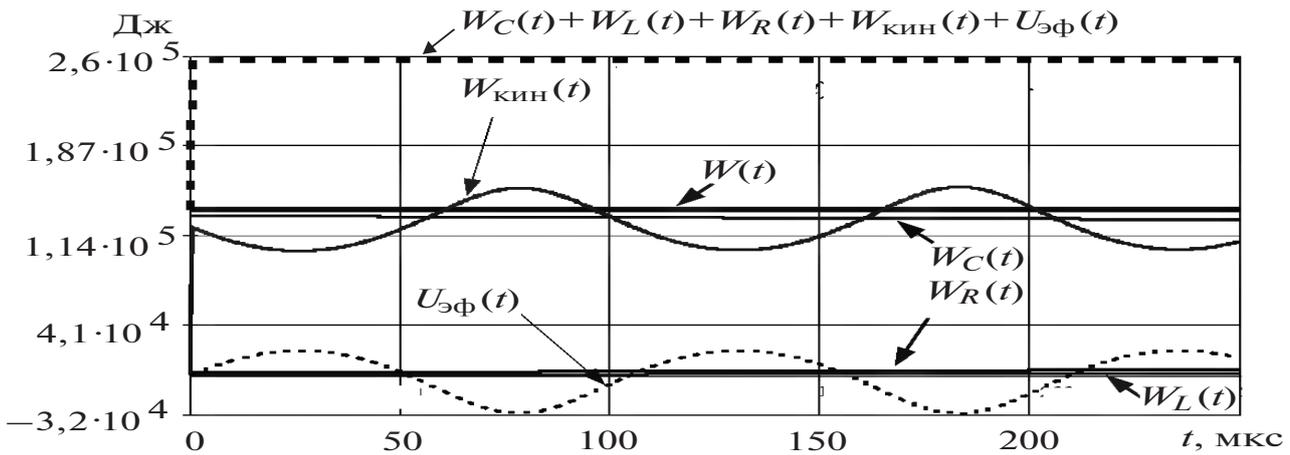


Рис. 5. Дисбаланс, при котором проявляются высокочастотные составляющие тока  $W(t) + W_C(t) + W_L(t) + W_R(t) + W_{кин}(t) + U_{эф}(t)$

Анализ данных таблицы свидетельствует о том, что модель правильно отражает тенденцию изменения процесса. Расхождение расчетных данных с экспериментальными составило около 20 %, что говорит об адекватности разработанной модели.

**Выводы.** 1. Получено полное представление об относительных вкладах различных видов энергии в формирование процесса и влиянии различных типов диссипации энергии, процессов переноса и трансформации одного вида энергии в другой.

2. Выявлено отрицательное влияние значения индуктивности индуктора КМПУ на скорость плазменного сгустка: при увеличении индуктивности растет продольная составляющая магнитного поля, а следовательно, и поперечная составляющая скорости заряженных частиц в плазменном сгустке. Отмечено положительное влияние значения индуктивности индуктора: при увеличении индуктивности последовательного электрического контура происходит стабилизация тока или увеличивается его сглаженность, стабилизируется неустойчивость плазмы, при этом усиливается трение заряженных частиц об электрод-ствол, следовательно, увеличивается эрозия металла.

3. Определено минимально допустимое значение индуктивности индуктора КМПУ, ниже которого проявляются высокочастотные составляющие тока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Электроэрозийная наработка материала в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе для нанесения покрытий. — Электротехника (Томск), 2005, № 6.
2. Сивков А.А., Корольков В.Л., Сайгаш А.С. Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью магнитоплазменного ускорителя. — Электротехника, 2003, № 8.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, т. 2: Теория поля. — М.: Наука, 1992.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, т. 1: Механика. — М.: Наука, 1992.
5. Сивков А.А., Исаев Ю.Н., Васильева О.В., Купцов А.М. Математическое моделирование коаксиального магнитоплазменного ускорителя. — Изв. Томского политех. ун-та, 2010, т. 317, № 4.
6. Васильева О.В., Исаев Ю.Н., Колчанова В.А. Расчет индуктивности на основе расчета электромагнитного поля. — Материалы IV Международ. научно-техн. конф. «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, 13–16 октября 2009. — Томск: ТПУ, 2009.

Авторы: Исаев Юсуп Ниязбекович в 1985 г. окончил электрофизический факультет ТПИ. В 2004 г. защитил докторскую диссертацию «Численно-аналитическое моделирование восстановления оптических сигналов и изображений». Профессор кафедры ТОЭ ТПУ.

Васильева Ольга Владимировна в 2006 г. окончила ЭЛТИ ТПУ. Старший преподаватель кафедры ТОЭ ТПУ.

\* \* \*

#### Уважаемые читатели!

Номера журнала «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» за 2010–2011 гг., а также ксерокопии статей с 1917 г. можно приобрести в редакции журнала

(Москва, Красноказарменная ул., 14, комн. 3-111, тел. (495) 362-7485)