

Физика плазмы и плазменные методы

УДК 533.9.07

Измерение динамической индуктивности камер плазменного фокуса

А.К. Дулатов, Б.Д. Лемешко, Ю.В. Михайлов,
И.А. Прокуратов, А.Н. Селифанов

В статье представлены результаты измерения динамической индуктивности камеры плазменного фокуса (ПФ) при работе установки с разрядным током ~ 800 кА. Значения индуктивности камеры вычислены на основе решения уравнения электрической цепи с использованием данных, полученных с пояса Роговского при работе установки ПФ. Сравнение полученных значений индуктивности со значениями, вычисленными на основе трех наиболее распространенных моделей движения токоплазменной оболочки в камерах ПФ, показало наиболее близкое соответствие значению, полученному на основе МГД- модели.

PACS: 84.37.+q; 52.58.Lq

Ключевые слова: плазменный фокус, динамическая индуктивность

Введение

В установках плазменного фокуса (ПФ) происходит формирование нецилиндрического Z-пинча. Они являются эффективными источниками нейтронного, мягкого и жесткого рентгеновского излучений, электронных и ионных пучков, а также кумулятивных плазменных струй.

Устройства ПФ работают по принципу трансформации электрической энергии, запасенной в конденсаторной батарее, в энергию магнитного поля, сосредоточенную вблизи пинча. Они состоят из генератора импульсных токов, разряжающегося на динамическую индуктивно-резистивную нагрузку в виде камеры плазменного фокуса. Разряд происходит при срабатывании высоковольтного коммутатора, передающего энергию конденсаторной батареи в камеру ПФ. Камера, в свою очередь, состоит из коаксиальной системы электродов, разделенных изолятором, вдоль поверхности которого происходит пробой и образуется токоплазменная оболочка (ТПО). Она начинает свое движение вдоль электродов за счет пондеромоторной силы и, в итоге, «схлопывается» в плотное пинчевое

образование на оси камеры. Эффективность формирования пинча и, как следствие, интенсивность выхода излучений во многом определяется значением разрядного тока в пинче.

При постоянной емкости конденсаторной батареи и рабочем напряжении значение тока, протекающего через пинч, определяется индуктивностью контура. Поэтому точное определение индуктивности установок ПФ является важной задачей.

Индуктивность установок ПФ складывается из двух частей — постоянной индуктивности контура и динамической индуктивности камеры. После пробоя вдоль поверхности изолятора в камере ПФ образуется и начинает двигаться ТПО, через которую протекает разрядный ток [1]. По мере движения ТПО вдоль стенок камеры ПФ происходит изменение конфигурации контура с током, что приводит к появлению динамической индуктивности камеры ПФ L_p . Необходимо также учитывать динамическое сопротивление камеры R_p , которое меняется по мере движения и нагрева ТПО. На рис. 1 приведена эквивалентная схема установки ПФ с учетом динамических индуктивности и сопротивления. Здесь использованы следующие обозначения: U_0 — зарядное напряжение конденсаторной батареи, C_0 — емкость конденсаторной батареи, К — коммутатор, R_0 — постоянное сопротивление контура, L_0 — постоянная индуктивность контура, L_p — динамическая индуктивность камеры, R_p — динамическое сопротивление камеры, I — ток в контуре.

Заметим, что динамическая индуктивность камеры может даже превышать постоянную индук-

Дулатов Али Каюмович, начальник лаборатории.

Лемешко Борис Дмитриевич, вед. научн. сотрудник.

Михайлов Юрий Владимирович, инженер.

Прокуратов Илья Александрович, инженер.

Селифанов Алексей Николаевич, инженер 1-й категор.

ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова.

Россия, 127055, г. Москва, Сущевская ул., 22

Тел.: (495) 321-45-55. Факс: (495) 787-76-93

E-mail: bogolubov@vniia.ru

Статья поступила в редакцию 10 октября 2013 г.

© Дулатов А.К., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А., Селифанов А.Н., 2013

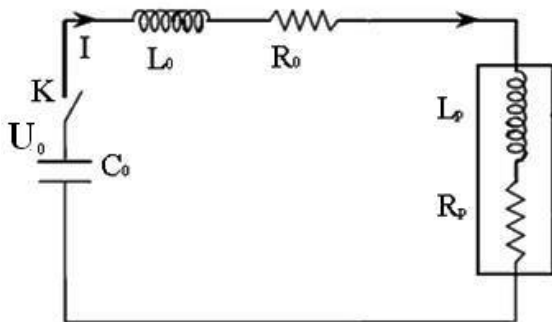


Рис. 1. Эквивалентная схема установки ПФ

тивность контура, поэтому её величиной нельзя пренебрегать.

Целью данной работы являлось экспериментальное определение динамической индуктивности камеры ПФ в интересах выявления наиболее адекватной теоретической модели расчета происходящих явлений в конкретных условиях ПФ.

Экспериментальное оборудование и моделирование его работы

В работе рассмотрена экспериментальная установка ПФ с емкостью конденсаторной батареи 144 мкФ. Работа установки производится при зарядном напряжении 19 кВ. Используется камера ПФ специальной конструкции (диаметр анода 78,5 мм, диаметр катода 114 мм, высота анода 84 мм), наполненная дейтерием до давления 20 Торр.

На рис. 2. приведена зависимость разрядного тока от времени, снятая интегрирующим поясом Роговского, при работе установки на камеру ПФ. Амплитуда тока составляет 840 кА, а значение тока в момент пинчевания (3,1 мкс) равно 660 кА. Спад тока в момент перед особенностью связан с резким ростом индуктивности камеры. Постоянные индуктивность контура $L_0 = 33$ нГн и сопротивление контура $R_0 = 6$ мОм определены с помощью разрядной методики [2] при работе установки на короткозамкнутую нагрузку, не имеющую динамических индуктивности и сопротивления.

Для того чтобы продемонстрировать влияние переменной индуктивности камеры на значение разрядного тока в момент пинчевания, работа описанной выше установки промоделирована в программе MicroCap [3]. Модель построена согласно схеме на рис. 1, при этом в неё заложено линейное изменение индуктивности камеры L_p , причем динамическое сопротивление камеры не учитывалось, т.е. $R_p = 0$. Результаты моделирования показали, что динамическая индуктивность

существенным образом влияет на амплитуду тока в пинче. Рост индуктивности L_p от 0 до 17 нГн (50% от L_0) за время достижения особенности снижает ток через пинч на 22% по сравнению со случаем отсутствия переменной индуктивности. Необходимо учесть, что в реальности рост индуктивности в отрезок времени, близкий к пинчеванию, имеет более резкий характер, что и обуславливает появление характерного спада на кривой разрядного тока.

Для оценки индуктивности камеры принято пользоваться расчетными моделями движения ТПО [4]. Нами рассмотрены три модели: пятифазная модель движения ТПО [5], магнитогидродинамическая (МГД) модель [6] и модель «снежного плуга» [1, 7]. В пятифазной модели применяется разбиение движения ТПО на отдельные фазы, а именно, радиальная фаза, аксиальная фаза, фаза стабильного пинча, фаза нестабильности и фаза распада пинча. На каждой из фаз вводятся дополнительные предположения о свойствах системы (коэффициент захвата газа, коэффициент доли общего тока, переходящего в ток пинча и т.д.) для корректного моделирования процессов в камере ПФ. МГД-модель применяется в рамках идеальной одножидкостной двумерной магнитной гидродинамики в предположении осесимметричного развития разряда и наличия только азимутального магнитного поля. В модели «снежного плуга» газ полностью захватывается токовой оболочкой, которая считается бесконечно тонкой. Модель позволяет в каждый момент времени определять конфигурацию ТПО. Результаты расчета по теоретическим моделям амплитуды разрядного тока I_m , тока в момент пинчевания I^* , а также индуктивности L^* описанной выше экспериментальной установки ПФ в момент пинчевания (при зарядном напряжении 19 кВ) представлены в табл. 1.

Таблица 1

	I_m , кА	I^* , кА	L^* , нГн
Пятифазная модель	850	580	67
МГД-модель	800	780	50
Модель снежного плуга	1100	950	43

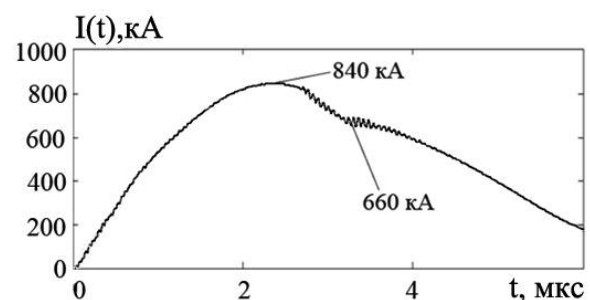


Рис. 2. Зависимость разрядного тока экспериментальной установки $I(t)$ от времени

Видно, что разные модели расчета движения ТПО дают сильно различающиеся результаты. Нами разработан метод определения переменной индуктивности, основанный на измерении сигнала разрядного тока с помощью интегрирующего пояса Роговского, позволяющий определить индуктивность установки ПФ на основе экспериментальных данных.

Метод определения переменной индуктивности

Индуктивность установки находится, подставляя в известное выражение разрядного тока RLC-контура (которое является решением дифференциального уравнения второго порядка с по-

$$L(t) = \frac{U_0 \sin(\omega_0 t) \pm \sqrt{(U_0 \sin(\omega_0 t))^2 - 2I(t)\omega_0 U_0 \sin(\omega_0 t)R(t)t}}{2I(t)\omega_0} \quad (2)$$

При этом $L(t)$ включает в себя постоянную индуктивность контура L_0 и переменную индуктивность камеры $L_p(t)$, т.е. $L(t) = L_0 + L_p(t)$.

Физическим является решение с положительным знаком перед квадратным корнем в формуле (2), так как индуктивность должна возрастать по мере движения ТПО.

В решении (2) присутствует сопротивление $R(t)$, зависящее от времени. Оно складывается из постоянного сопротивления контура R_0 и переменного сопротивления камеры $R_p(t)$ за счет изменения температуры плазмы по мере движения ТПО. Оценка переменного сопротивления плазмы получена по формуле Спитцера [9] через электронную температуру плазмы, найденную по МГД-модели [6]. Переменное сопротивление камеры изменяется от 0,7 мОм до 0,2 мОм за 3,1 мкс и имеет экспоненциальный характер во времени.

Описанная методика применена к экспериментальной установке ПФ, причем за основу анализа взята осциллограмма разрядного тока установки (см. рис. 2).

На рис. 3 показан результат вычисления значений $L(t)$, а также представлены значения индуктивности установки согласно трем вышеуказанным расчетным моделям: пятифазной модели движения ТПО, МГД-модели и модели «снежного плуга».

Значения динамической индуктивности камеры $L_p(t)$ в момент пинчевания представлены в табл. 2. Здесь учтены следующие соотношения: $L_p(t) = L(t) - L_0$, $L_0 = 33$ нГн.

стоянными коэффициентами) значения индуктивности и сопротивления контура, зависящие от времени. Такой подход возможен в силу устойчивости решения дифференциального уравнения для данного рода задач [8]. В результате получаем выражение (1). При этом ток $I(t)$ измеряется экспериментально с помощью интегрирующего пояса Роговского.

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega_0 L(t)} \exp\left(-\frac{R(t)}{2L(t)}t\right) \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

Путем разложения экспоненты в ряд Тейлора по первым двум членам в выражении (1) получаем уравнение для определения $L(t)$, решая которое получаем выражение для нахождения полной индуктивности $L(t)$ установки ПФ, а именно:

Таблица 2

Расчетная модель	$L_p(t)$, нГн
Из осциллограммы $I(t)$	(19 ± 2)
МГД-модель	18
Модель «снежного плуга»	9
Пятифазная модель	34

Полученные по предложенному методу значения динамической индуктивности камеры в момент пинчевания близки к значениям индуктивности согласно МГД-модели, однако характер зависимости соответствует пятифазной модели движения ТПО. Модель снежного плуга дает несколько заниженное значение динамической индуктивности по сравнению с другими моделями и предложенным методом расчета.

Проверка достоверности полученных результатов проводилась путем моделирования работы экспериментальной установки ПФ в программе

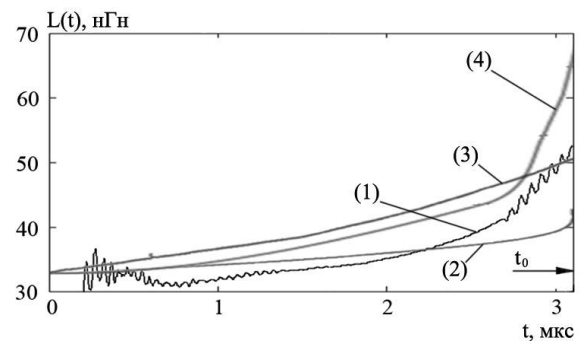


Рис. 3. Зависимость индуктивности установки $L(t)$ от времени: кривая (1) — из экспериментальной зависимости разрядного тока $L_{\text{эксн}}(t)$; (2) — из модели «снежного плуга»; (3) — из пятифазной модели движения ТПО; (4) — из МГД-модели, t_0 — момент пинчевания

MicroCap, в которой задавалась найденная зависимость $L_{\text{эсп}}(t)$ и восстанавливалась кривая разрядного тока. Рассчитанная кривая разрядного тока достаточно точно совпала с осциллограммой разрядного тока с интегрирующего пояса Роговского (рис. 4). На данном рисунке также приведена зависимость разрядного тока от времени для постоянных значений индуктивности L_0 и сопротивления R_0 контура.

Дополнительно данная методика проверена для случая отсутствия переменной индуктивности. Зависимость разрядного тока от времени для постоянных индуктивности $L(t) = L_0 = 33$ нГн и сопротивления $R(t) = R_0 = 6$ мОм подставлена в уравнение (1). В результате, найдена зависимость индуктивности от времени для случая постоянных параметров контура, которая в пределах

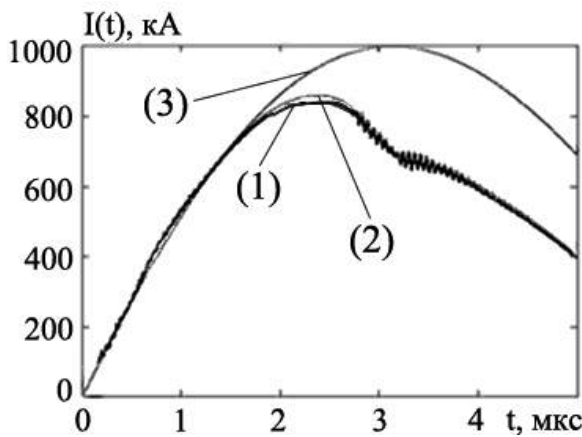


Рис. 4. Сравнение восстановленной кривой разрядного тока $I(t)$ с учетом динамической индуктивности $L_p(t)$ — кривая (1); со снятой поясом Роговского осциллограммой — (2) и с восстановленной кривой без учета $L_p(t)$ — (3)

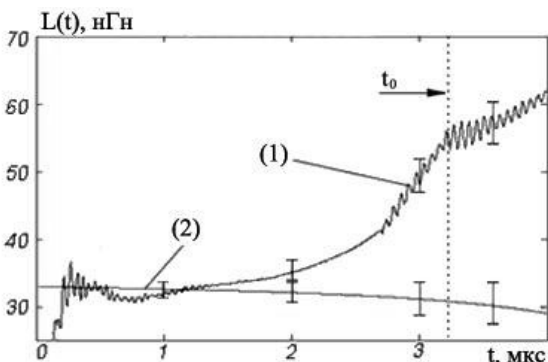


Рис. 5. Зависимость индуктивности от времени для случая переменных значений индуктивности и сопротивления разрядного контура — экспериментальная кривая (1) и постоянных — кривая (2)

погрешности оказалась постоянной. Результаты расчета показаны на рис. 5, там же приведена найденная ранее экспериментальная зависимость индуктивности контура от времени.

Заключение

В статье предложен метод определения переменной индуктивности камер ПФ посредством измерения кривой разрядного тока поясом Роговского.

Проведена проверка метода для экспериментальной установки ПФ. Кривая разрядного тока, восстановленная по полученной экспериментальной зависимости индуктивности от времени, совпала с экспериментальной кривой разрядного тока.

Сравнение полученных значений индуктивности со значениями, вычисленными на основе трех наиболее распространенных моделей движения токоплазменной оболочки в камерах ПФ, показало наиболее близкое соответствие значению, полученному на основе МГД- модели.

Описанный метод позволяет производить оценку значения динамической индуктивности и амплитуды разрядного тока установок ПФ.

Литература

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Том IX-3. Радиационная плазмодинамика. Янус-К. 2007.
2. Podlesak M. // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. No. 2. P. 892.
3. Micro-Cap 10 Evaluation Version // Spectrum Software. URL: <http://www.spectrum-soft.com>.
4. Lee S., Saw S.H. // Energies. 2010. No. 3. P. 711
5. Rafique M.S. Compression dynamics and radiation emission from a deuterium plasma focus. The thesis submitted for the degree of doctor of philosophy. National institute of education Nanyang Technological University. Nanyang. 2000.
6. Вихрев В.В., Юрков Д.И., Лемешко Л.Б. и др. Двумерный магнитогидродинамический код для расчета плазменного фокуса. Государственная программа для ЭВМ № 2011616791. ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова». 2011.
7. Вихрев В.В. // ПМТФ. 1973. № 2. С. 160
8. Григорьев А.Н. Потери энергии в разряднике и его коммутационная характеристика при электрическом взрыве проводника. Известия Томского политехнического университета. 2008.
9. Арцимович Л.А. Элементарная физика плазмы. — М.: Атомиздат. 1966.

Measurement of the dynamic inductance of the plasma focus chamber

A.K. Dulatov, B.D. Lemeshko, J.V. Mikhailov, I.A. Prokuratov, and A.N. Selifanov

All-Russian Research Institute of Automatics (VNIIA)
22 Sushchevskaya str., Moscow, 127055, Russia
E-mail: bogolubov@vniia.ru

This report represents results of the measurement of the variable inductance of the plasma focus (PF) chamber that was a part of the PF device with the discharge current ~ 800 kA. The values of the PF chamber inductance were calculated by using the solution of the PF circuit equation and data, obtained from the Rogowski coil. The results were compared with the values of the PF chamber inductance calculated by three widespread theoretical models of the plasma-current sheath motion. The determined value of the PF chamber inductance corresponds to the value of the inductance found by the magneto hydrodynamic model.

PACS: 84.37.+q; 52.58.Lq

Keywords: plasma focus, dynamic inductance

Bibliography — 9 references

Received October 10, 2013