

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 533.9.07

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТОКАМАКА МИФИСТ-0

© 2025 г. С. А. Крат^а, *, Д. В. Колодко^а, И. И. Пашков^а, Д. Л. Уласевич^а, А. С. Пришвицын^а,
Н. Е. Ефимов^а, Ф. С. Подоляко^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: SAKrat@mephi.ru

Поступила в редакцию 01.11.2024 г.

После доработки 20.11.2024 г.

Принята к публикации 22.11.2024 г.

Определены собственные и взаимные индуктивности центрального индуктора, катушек PF1–PF6 электромагнитной системы токамака МИФИСТ-0 и разрядной камеры токамака в диапазоне частот от 50 Гц до 15000 Гц. Установлено, что в области низких частот до ~200 Гц для определения взаимных наводок наиболее сильно связанных катушек возможно представить разрядную камеру как один короткозамкнутый виток, индуктивно связанный с катушками полоидальной системы.

Ключевые слова: токамак, индуктивность, система питания, трансформатор

DOI: 10.56304/S2079562925060144

1. ВВЕДЕНИЕ

Токамак — “тороидальная камера с магнитными катушками” представляет собой сложное электро-техническое устройство, в основе которого лежит электромагнитная система, состоящая из большого количества компактно расположенных катушек магнитного поля. В силу близкого расположения отдельных катушки электромагнитной системы токамаков практически всегда оказываются индуктивно связаны между собой [1–3]. Возникающие в результате этого наведенные в катушках напряжения существенно усложняют управление плазмой в токамаке, особенно в случаях реализации сложных сценариев токов, в частности при реализации систем управления с быстрыми обратными связями.

Присутствие токопроводящей разрядной камеры токамака вблизи катушек электромагнитной системы, представляющей собой короткозамкнутую индуктивность сложной геометрии, дополнительно осложняет ситуацию, описание и предсказание поведения электромагнитной системы как целого.

Из-за этого экспериментальное измерение индуктивностей, как собственных, так и взаимных, коэффициента индуктивной связи между катушками электромагнитной системы и разрядной камерой токамака является наиболее эффективным способом определения индуктивных характеристик электромагнитной системы токамака.

В данной работе представлены результаты измерений собственных и взаимных индуктивностей катушек электромагнитной системы токамака МИФИСТ-0 с учетом влияния вакуумной камеры.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Электромагнитная система токамака
МИФИСТ-0

Схема расположения основных катушек электромагнитной системы токамака МИФИСТ-0 [4] представлена на рис. 1. Координаты расположения катушек в системе, связанной с геометрическим центром разрядной камеры токамака, и их основные геометрические характеристики представлены в табл. 1.

В электромагнитной системе токамака на текущий момент используется 6 основных катушек полоидального поля PF1–PF6, и центральный соленоид (индуктор). И катушки, и центральный соленоид изготовлены из медной шины М1 с прямоугольным сечением 2×8 . Катушки представляют собой плоские спирали с шагом спирали

Таблица 1. Координаты расположения геометрических центров катушек полоидальной системы токамака МИФИСТ-1

Катушки	PF1, PF2	PF3, PF4	PF5, PF6
R, мм	190	420	550
Z, мм	± 368	± 368	± 165

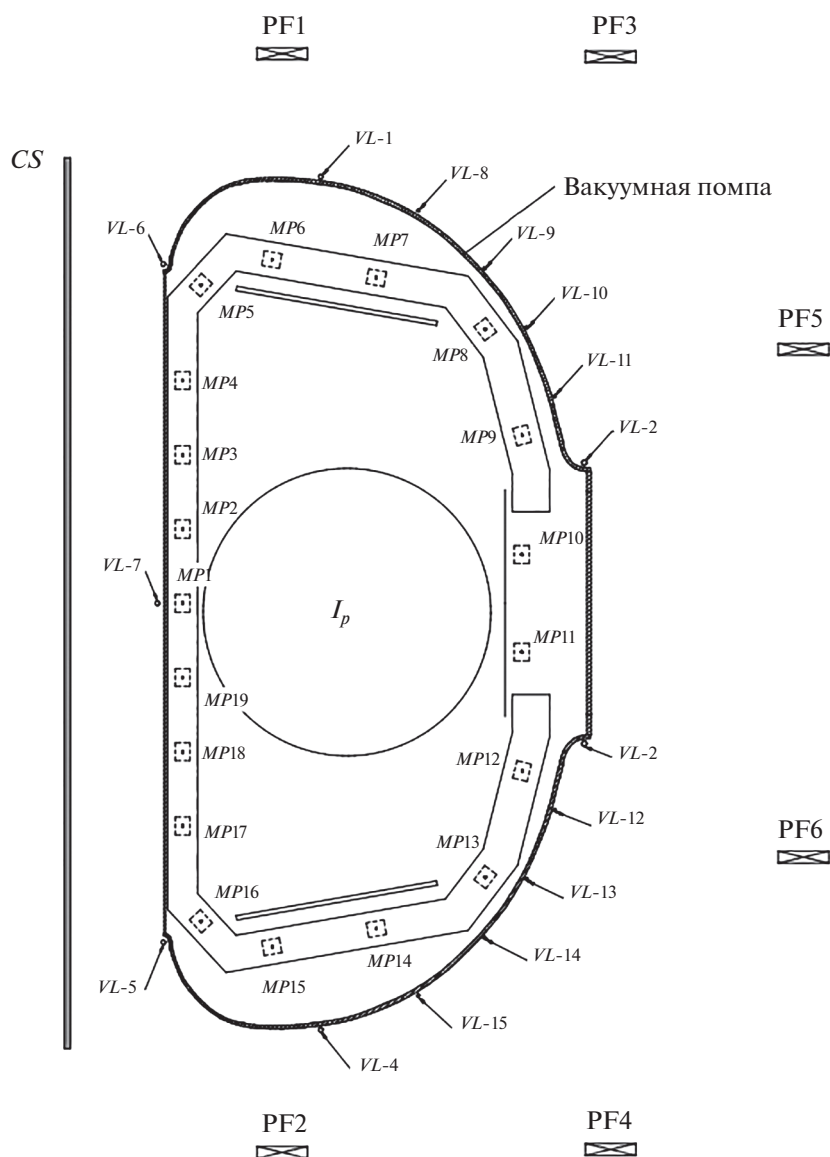


Рис. 1. Сечение разрядной камеры токамака МИФИСТ-0 с указанием расположения центрального соленоида (CS) и полоидальных катушек (PF). VL — петли измерения напряжения на обходе, MP — датчики магнитного поля (катушки Мирнова). I_p — оценочное положение плазменного шнура.

~2.6 мм. Каждая катушка имеет 16 витков, таким образом толщина каждой катушки ~45 мм. Центральный соленоид — линейный двуслойный соленоид.

Для реализации диверторных конфигураций плазмы в токамаке необходимо отдельное управление током в каждой из катушек. Управление током в катушках будет осуществляться при помощи источников тока на основе полномостовой схемы [4, 5]. Характерная частота работы (открытия и закрытия) транзисторов, применяемых в блоках питания — 15 кГц. Пример рассчитанного сценария токов по катушкам, необходимых для реализации однонулевой диверторной конфигурации, реализация которой представляет науч-

ный интерес и является одной из целей развития токамака, представлен на рис. 2 слева; справа представлено Фурье-разложение сигналов, демонстрирующее наиболее характерные частоты сигналов. Можно видеть, что основные частоты сигналов (не считая постоянной компоненты $f \sim 0$ Гц) лежат в диапазоне частот до 500 Гц, часто с особенностью в области частот 50–200 Гц.

2.2. Метод определения собственных и взаимных индуктивностей катушек вблизи разрядной камеры

Для определения индуктивности исследуемых элементов электромагнитной системы использовался измеритель RLC “Актаком АМ-3028” Из-

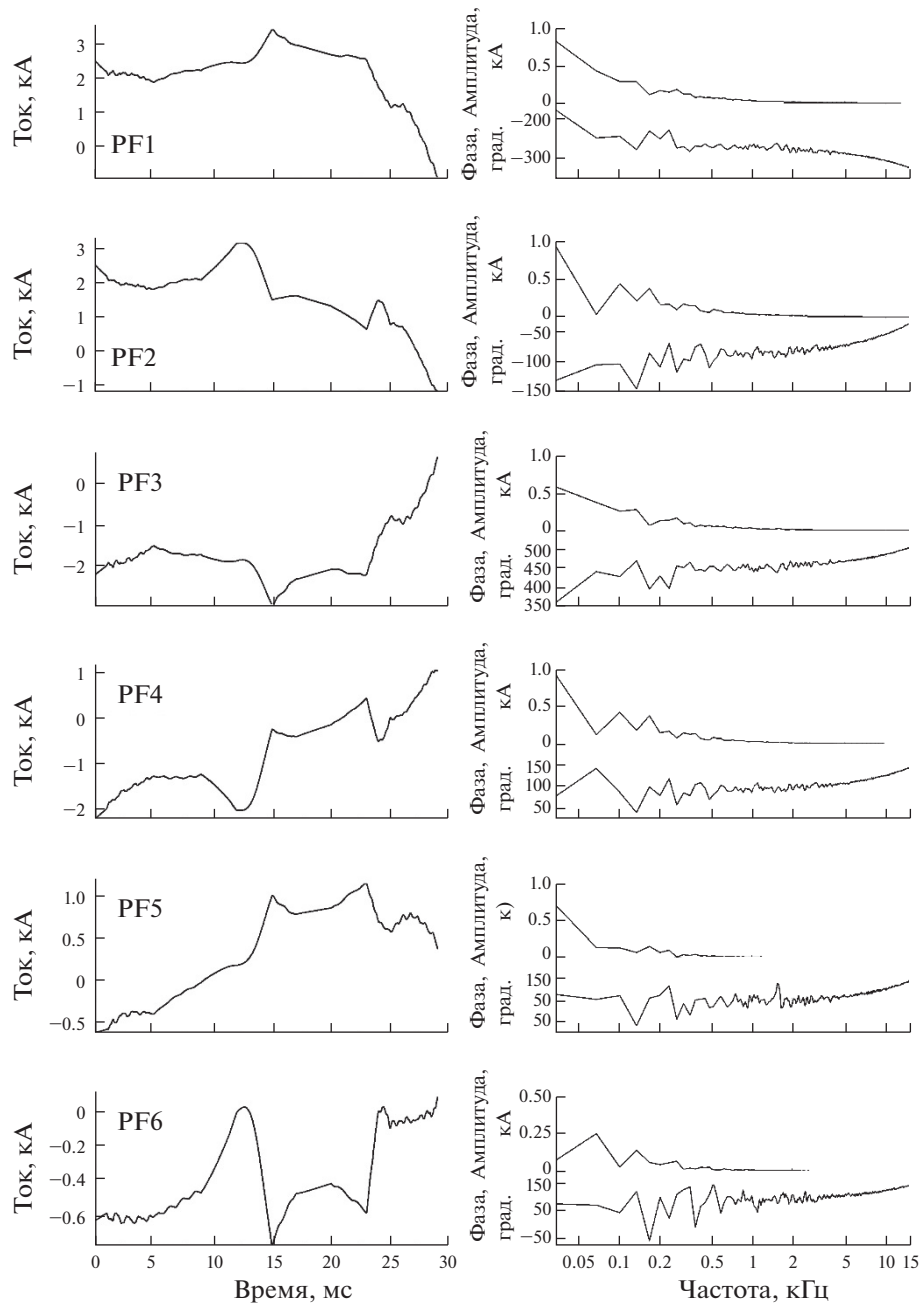


Рис. 2. Зависимость токов в катушках полоидального поля от времени (левая колонка) и Фурье-разложение данных зависимостей (справа), необходимых для получения диверторной конфигурации в токамаке МИФИСТ-0. Сверху вниз — для катушек PF1–PF6.

мерения проводились на частотах 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 15000 Гц. При измерениях применялась модель последовательного RL-контура. Максимальная частота измерений определялась рабочей частотой транзисторов, с помощью которых реализована схема питания полоидальных катушек. Для определения взаимной индуктивности применялась методика последовательного соединения катушек. При последовательном подключении двух катушек индуктивности сум-

марная индуктивность полученного контура определяется как

$$L_{1\pm 2} = L_1 + L_2 \pm 2M_{1-2}, \quad (1)$$

где L_1, L_2 — собственные индуктивности катушек, M_{1-2} — взаимная индуктивность, знак $\pm$ зависит от направления подключения катушек (последовательно или антипоследовательно). Таким образом, величина взаимной индуктивности опреде-

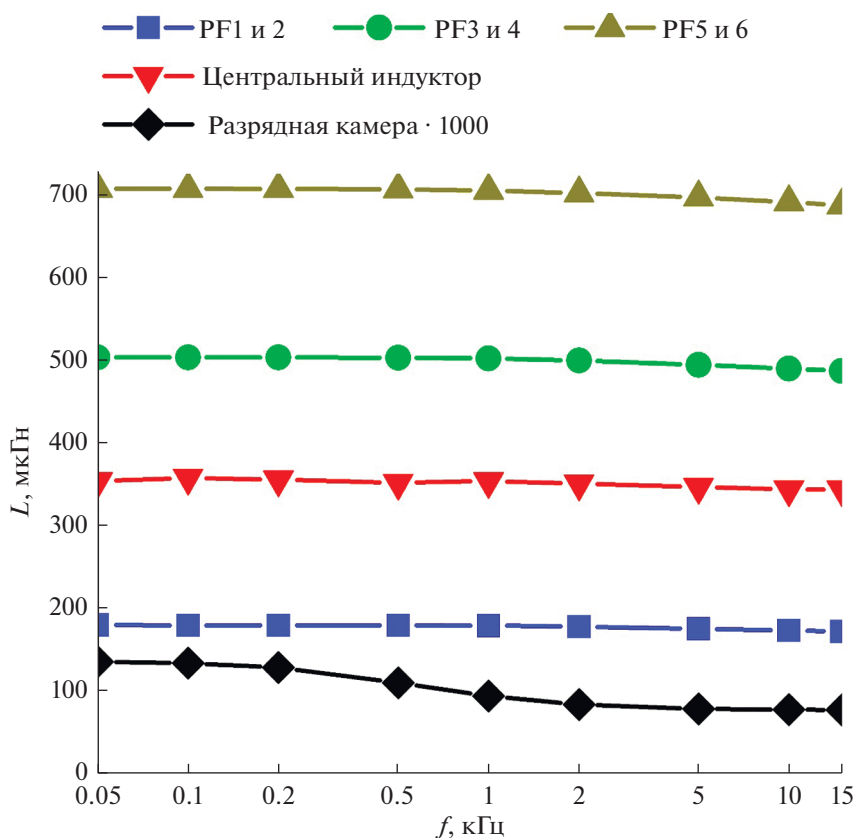


Рис. 3. Собственные индуктивности элементов электромагнитной системы токамака МИФИСТ-0 в зависимости от частоты тока, протекающей через них.

лялась как $M_{1-2} = (L_{1+2} - L_{1-2})/4$. При этом при проводимых измерениях все остальные полоидальные катушки должны быть разомкнуты, а на полученные величины будет влиять присутствие вблизи катушек разрядной камеры токамака, которая представляет собой короткозамкнутый индуктивный элемент.

2.3. Моделирование индуктивностей катушек и камеры

Для определения влияния разрядной камеры на измеряемые индуктивности необходимо было определить их в отсутствие разрядной камеры, а также индуктивность самой разрядной камеры. Демонтаж катушек был признан нецелесообразным в силу его большой трудозатратности. Поэтому было принято решение об определении собственных индуктивностей методом численного моделирования в среде COMSOL.

Моделирование производилось в трехмерной геометрии с учетом геометрии витков и зазоров между витками. В сферическом расчетном объеме попарно располагались катушки в соответствии с расположением их в реальной геометрии.

Материал катушек медь. Пространство между ними заполнено вакуумом с относительными диэлектрической и магнитной проницаемостью равной единице.

Взаимные индуктивности были определены в пределе низких частот.

Расчеты для разрядной камеры проводились в двумерном приближении в связи с невозможностью сформировать трехмерную расчетную сетку без использования средств суперкомпьютерного моделирования.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Расчетные индуктивности

Графики зависимостей собственных индуктивностей катушек электромагнитной системы и разрядной камеры токамака от частоты тока, протекающих по ним, представлены на рис. 3. Таблица взаимных индуктивностей катушек полоидального поля представлена в табл. 2.

Можно видеть, что для полоидальных катушек индуктивности и центрального индуктора, изготовленных из медной шины прямоугольного се-

чения 2×8 мм характеристики индуктивности меняются слабо с частотой, в то время как для разрядной камеры в диапазоне от ~ 200 Гц до ~ 2 кГц наблюдается существенное, приблизительно двукратное уменьшение индуктивности. Толщина скин-слоя для стали AISI304 на частоте 15 кГц составляет ~ 3.5 мм, что больше толщины самого толстого элемента стенки камеры (3 мм на внешнем обходе). Таким образом существенное изменение индуктивности связано со сложной геометрией разрядной камеры и взаимным воздействием элементарных тороидальных токов, текущих по ней.

3.2. Экспериментальные значения

Зависимости эффективных собственных и взаимных индуктивностей катушек электромагнитной системы, измеренных в присутствии разрядной камеры токамака, представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

По полученным данным можно отметить одинаковый качественный вид кривых для всех катушек. Для катушек PF1–PF6 можно выделить два частотных диапазона — до ~ 100 – 200 Гц и свыше 2000 Гц, в которых величины взаимной и собственной индуктивностей короткого замыкания практически постоянны, и переходный участок

Таблица 2. Взаимные индуктивности катушек полонидальной системы токамака МИФИСТ-0, мкГн

	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6
PF1		1.16	44.6	3.90	22.7	8.51
PF2	1.16		3.90	44.6	8.51	22.7
PF3	44.6	3.90		14.6	125	39.0
PF4	3.90	44.6	14.6		39.0	125
PF5	22.7	8.51	125	39.0		110
PF6	8.51	22.7	39.0	125	110	

между этими диапазонами частот. Данный вид зависимости хорошо совпадает с расчетными результатами, полученными для собственной индуктивности разрядной камеры (рис. 3), и определяется, очевидно, экранировкой камерой переменного поля, создаваемого катушками. Интересно отметить, что для центрального индуктора участок перехода смещен в область больших частот, от ~ 1 до ~ 10 кГц.

Разрядная камера эффективно экранирует катушки, находящиеся в верхней части токамака от

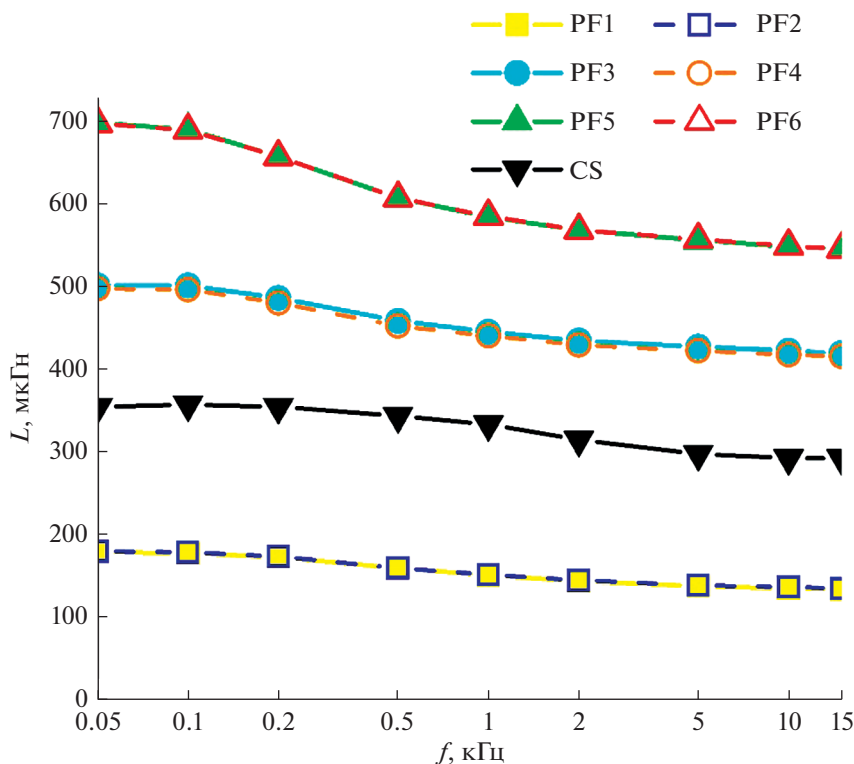


Рис. 4. Зависимость собственных индуктивностей короткого замыкания для катушек электромагнитной системы токамака МИФИСТ-0 для различных частот.

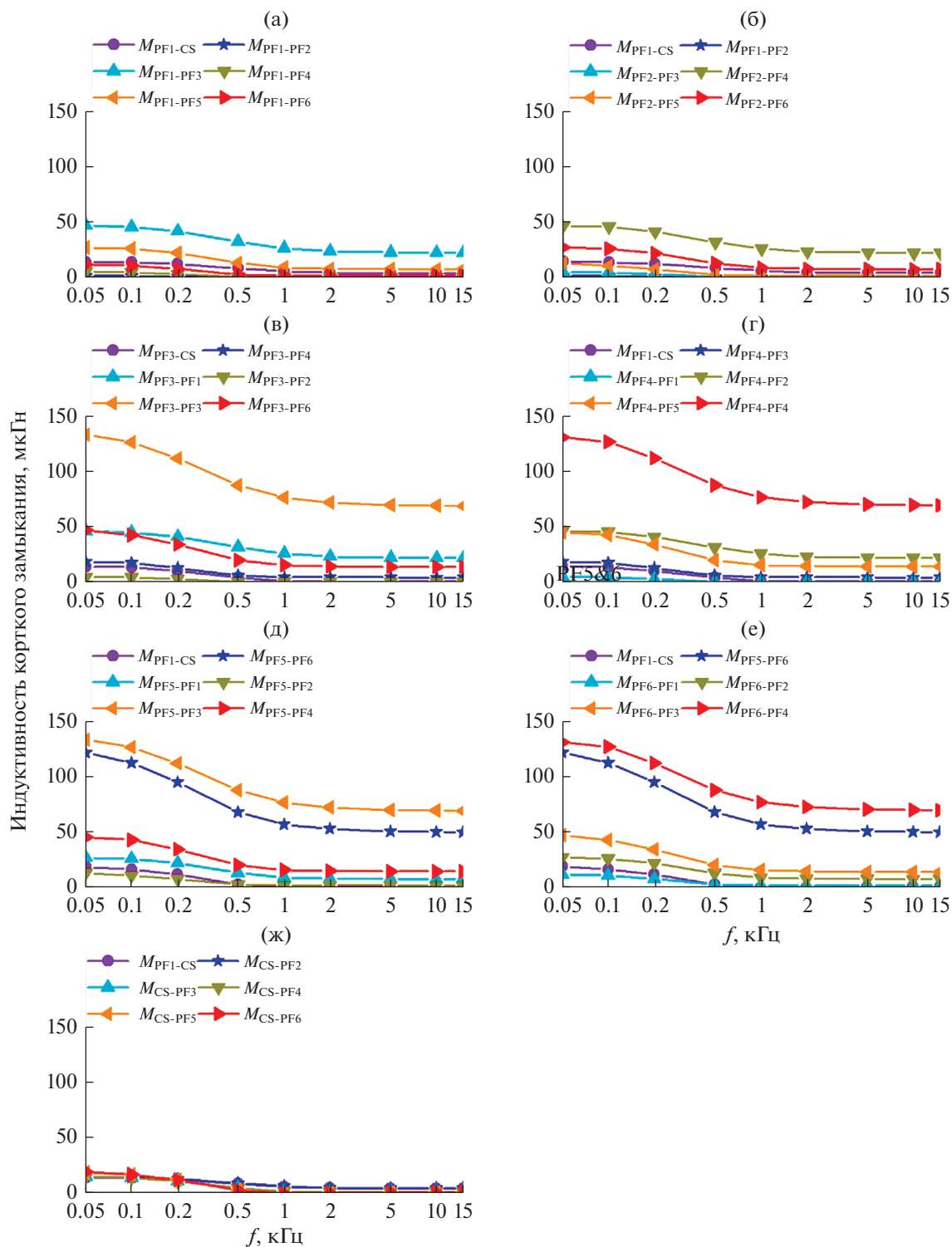


Рис. 5. Взаимные индуктивности короткого замыкания для катушек электромагнитной системы токамака МИФИСТ-0 для различных частот: (а) катушка PF1, (б) катушка PF2, (в) катушка PF3, (г) катушка PF4, (д) катушка PF5, (е) катушка PF6, (ж) центральный соленоид.

катушек, находящихся в нижней части токамака, особенно на частотах выше 1 кГц. Это выражается в уменьшении взаимной индукции короткого замыкания до нуля для пар катушек PF1 и PF3, PF2 и PF4. Для катушек PF5, PF6 связь сохраняется более всего. Наиболее подверженными наводкам со стороны других элементов электромагнитной системы являются катушки PF1, PF2.

4. ВЛИЯНИЕ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ

Как уже упоминалось выше, разрядная камера — это индуктивность сложной геометрии, короткозамкнутая в тороидальном направлении. При расчете распределений магнитных полей в токамаках часто используется подход, при котором разрядную камеру представляют в качестве большого количества элементарных элементов (колец), индуктивно связанных между собой [6–8]. Для целей учета влияния разрядной камеры на токи и напряжения в катушках электромагнитной системы целесообразно применить тот же подход, но свести количество элементов, в виде которых представлена камера, к минимуму.

Наиболее простым решением является замена разрядной камеры на один короткозамкнутый виток с индуктивностью, равной расчетной индуктивности разрядной камеры для каждой частоты тока. В таком случае собственные и взаимные индуктивности катушек полоидальной системы будут определяться как

$$L_i^{K3} = (1 - k_{i-камера}^2) L_i, \quad (2)$$

$$M_{i-j}^{K3} = \left(1 - \frac{k_{i-камера} k_{j-камера}}{k_{ij}} \right) M_{ij}, \quad (3)$$

где L_i — собственная индуктивность катушки i , L_i^{K3} — собственная индуктивность катушки i , измеренная вблизи разрядной камеры, $k_{i-камера}$, $k_{j-камера}$ — коэффициенты индуктивной связи катушек i и j с индуктивностью, которой моделируется разрядная камера, M_{ij} — взаимная индуктивность катушек i и j , M_{i-j}^{K3} — взаимная индуктивность катушек i и j вблизи разрядной камеры (представлены на рис. 3), k_{ij} — коэффициент индуктивной связи катушек i и j .

Для того, чтобы определить границы применимости одновитковой модели разрядной камеры, на основании экспериментальных данных о собственных и взаимных индуктивностях вблизи разрядной камеры, и данных о собственных индуктивностях, полученных путем численных расчетов, были восстановлены собственные индук-

тивности всех пар катушек при различных частотах. Полученные результаты были сравнены с данными численного моделирования (табл. 2). Результаты представлены на рис. 6.

Можно видеть, что для наиболее индуктивно связанных катушек (PF1–PF3, PF2–PF4, PF3–PF5, PF4–PF6, PF5–PF6) в области низких частот (до 200 Гц) наблюдается неплохое совпадение между взаимными индуктивностями, рассчитанными в одновитковом приближении и взаимными индуктивностями, полученными для полоидальных катушек без разрядной камеры. Для катушек, прямая видимость между которыми перекрыта разрядной камерой, расхождение между одновитковой моделью разрядной камеры и независимым расчетом существенно больше, они отличаются приблизительно в два раза при низких частотах.

С ростом частоты взаимная индуктивность, восстановленная на основе экспериментальных данных в приближении одновитковой модели, начинает возрастать, и выходит “в насыщение” при частотах выше 2 кГц. Такое увеличение говорит о переоценке вклада разрядной камеры в измеряемые индуктивности, как собственную, так и взаимные. В данной области частот необходимо применять более сложную модель камеры.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены расчетные и экспериментальные значения собственных и взаимных индуктивностей катушек полоидальной системы токамака МИФИСТ-0, позволяющие предсказывать наводки напряжений в каждой из них при протекании изменяющегося во времени тока по смежным катушкам.

Показано, что для низких частот до ~200 Гц влияние разрядной камеры на взаимные индуктивности наиболее индуктивно связанных катушек может быть описано путем представления разрядной камеры как одного короткозамкнутого витка, индуктивно связанного с катушками полоидальной системы.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть применены для разработки индуктивной развязки, позволяющей скомпенсировать наводки напряжений между катушками полоидальной системы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке НИР “Исследования в области взаимодействия плазмы с обращенными к плазме элементами на учебно-демонстрационной установке типа “токамак” в НИЯУ МИФИ с

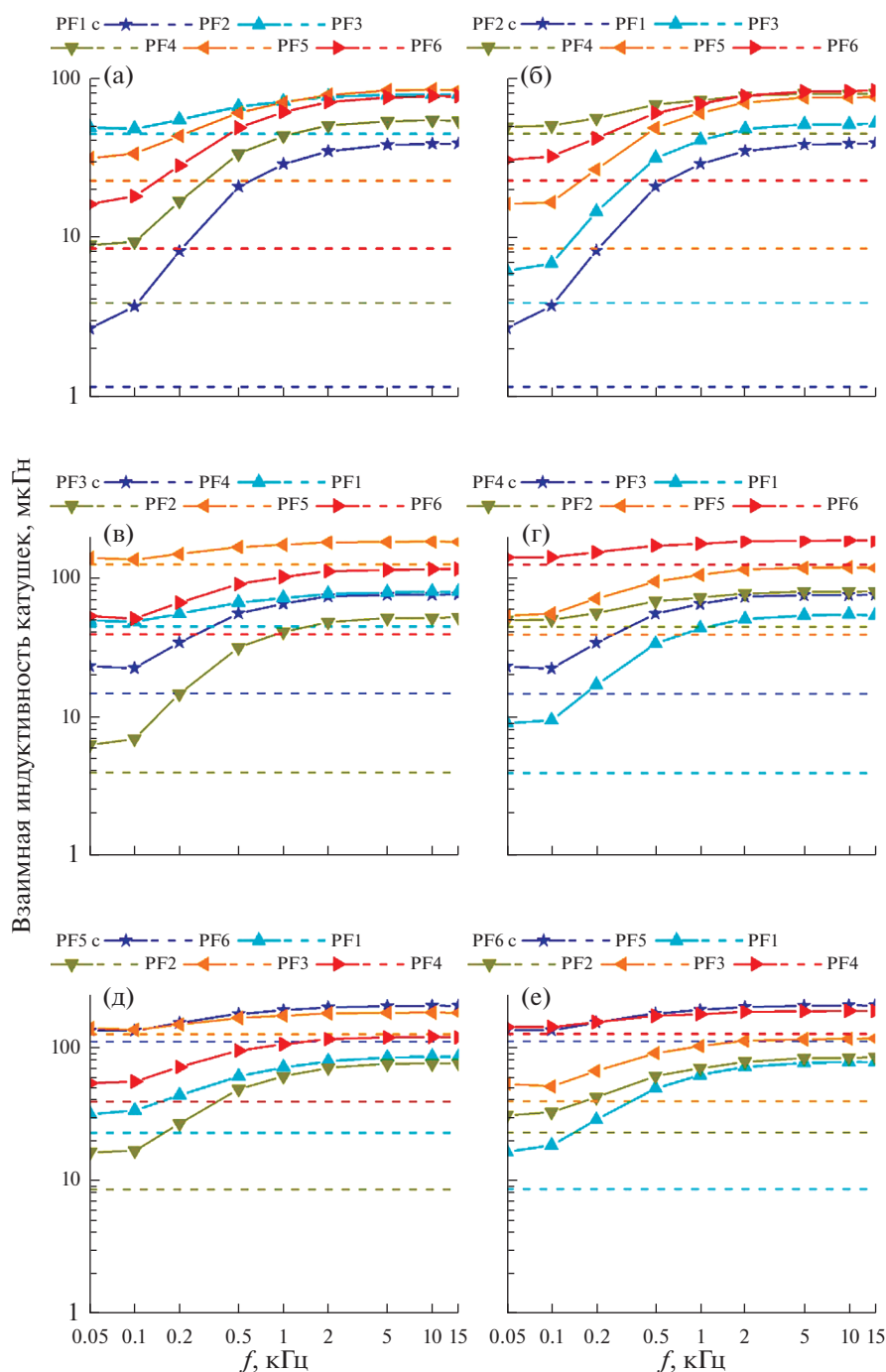


Рис. 6. Зависимости взаимных индуктивностей катушек полоидальной системы от частоты. Сплошные линии с точками — данные, восстановленные на основе экспериментального измерения. Пунктирные линии — численный расчет в пределе низких частот: (а) взаимные индуктивности катушки PF1 с остальными катушками полоидальной системы, (б) катушки PF2, (в) PF3, (г) PF4, (д) PF5, (е) PF6.

привлечением студентов и аспирантов” (дополнительное соглашение № 075-03-2023-097/4 от 17.04.2023 г. к Соглашению № 075-03-2023-097 от 13.01.2023 года), выполняемого в рамках федерального проекта № 3 “Разработка технологий управляемого термоядерного

синтеза и инновационных плазменных технологий” комплексной программы “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 г.”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Albanese R., Bellesia B., Palmaccio R., et al.* // Int. J. Appl. Electromagn. Mech. 2012. V. 39. P. 65–71.
<https://doi.org/10.3233/JAE-2012-1444>
2. *Ivanov D.P., Anashkin I.O., Drabinskiy, et al.* // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85 (7). P. 1145–1153.
<https://doi.org/10.1134/S1063778822070043>
3. *Ahmad Z., Ahmad S., Naveed M.A., et al.* // Phys. Scr. 2017. V. 92. P. 045601.
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa6458>
4. *Krat S., Prishvitsyn A., Alieva A., et al.* // Fusion Sci. Technol. 2023. V. 79. P. 446–464.
<https://doi.org/10.1080/15361055.2022.2149033>
5. *Agredano-Torres M., Garcia-Sanchez J.L., Mancini A., et al.* // Fusion Eng. Des. 2021. V. 168. P. 112683.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112683>
6. *Sychugov D.Y., Soloviev S.Y., Zhilkin A.S., Melnikov A.V., Krat S.A.* // Plasma Sci. Technol. 2023. V. 25. P. 035602.
<https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac9f05>
7. *Ulasevich D.L., Khayrutdinov R.R., Lukash V.E., et al.* // Probl. At. Sci. Technol. Ser.: Thermonucl. Fusion. 2022. V. 45. P. 98–107.
<https://doi.org/10.21517/0202-3822-2022-45-1-98-107>
8. *Khayrutdinov R.R., Lukash V.E.* // J. Comput. Phys. 1993. V. 109. P. 193–201.
<https://doi.org/10.1006/jcph.1993.121>

Identification of the Inductive Characteristics of the Electromagnetic System of the Tokamak MEPhIST-0

S. A. Krat^{1,*}, D. V. Kolodko¹, I. I. Pashkov¹, D. L. Ulasevich¹,
A. S. Prishvitsyn¹, N. E. Efimov¹, and F. S. Podolyako¹

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

^{*}*e-mail: SAKrat@mephi.ru*

Received November 1, 2024; revised November 20, 2024; accepted November 22, 2024

Abstract—The intrinsic and mutual inductivities of the central inductor, coils PF1–PF6 of the MEPhIST-0 electromagnetic tokamak system and the tokamak discharge chamber in the frequency range from 50 to 15000 Hz are determined. It has been found that in the low frequency range up to ~200 Hz, to determine the mutual effects of the most strongly coupled coils, it is possible to represent the discharge chamber as one short-circuited coil inductively connected to the coils of a poloidal system.

Keywords: tokamak, inductance, power supply system, transformer