

В. В. Поступаев^{1,2}, **А. В. Судников**²¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: V.V.Postupaev@inp.nsk.su

МАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-3*

Рассматриваются работы по созданию диагностики искажений формы токовых поверхностей в плазме многопробочной ловушки ГОЛ-3. Обсуждаются результаты экспериментов с одноканальным прототипом магнитного датчика. Показано, что существуют высокочастотные возмущения азимутального магнитного поля вблизи стенки вакуумной камеры как во время существования холодной предварительной плазмы в установке, так и при ее нагреве сильноточным релятивистским электронным пучком. Полученные результаты дали основание для начала работ по созданию полной 16-канальной системы.

Ключевые слова: плазма, диагностика плазмы, магнитная диагностика, многопробочная ловушка.

Введение

Одной из основных задач физики высокотемпературной плазмы является увеличение энергетического времени жизни плазмы в ловушках с магнитным удержанием. Практически во всех известных системах время жизни плазмы определяется не классическими процессами переноса энергии и частиц, а коллективными явлениями, в частности турбулентностью. Уменьшение коллективных потерь энергии возможно, если удастся выявить и устранить конкретные механизмы, приводящие к развитию турбулентности в данной экспериментальной установке. Для этого в качестве первого шага необходима диагностическая методика, которая давала бы информацию о временном и пространственном спектре плазменных колебаний. Создание наиболее простого варианта такой диагностики для многопробочной ловушки ГОЛ-3 и является целью настоящей работы.

Установка ГОЛ-3 [1] является единственной в мире ловушкой, принадлежащей к классу многопробочных открытых систем магнитного удержания плазмы. В этой схеме плазма удерживается в «гофрированном»

(периодически изменяющемся по напряженности вдоль оси системы) магнитном поле. Если плотность плазмы достаточно велика, т. е. длина свободного пробега иона много меньше длины установки, то расширение плазмы вдоль магнитного поля носит диффузионный характер и характерное время потери частиц растет пропорционально квадрату полной длины магнитной системы [2]. Для конкретных условий установки ГОЛ-3 выигрыш во времени жизни плазмы по сравнению с простым соленоидом составляет приблизительно два порядка величины. Тем не менее по абсолютной величине время жизни плазмы в ГОЛ-3 остается небольшим, порядка 1 мс, поэтому для нагрева плазмы в ловушке применяется сильноточный релятивистский электронный пучок, инжектируемый вдоль магнитного поля через один из торцов.

Ниже приведены технические параметры установки в обсуждаемой серии экспериментов. Соленоид установки состоит из 110 катушек с независимым питанием общей длиной около 12 м. Магнитное поле имеет 55 периодов гофрировки (ячеек многопробочной системы) с полем в максимум

* Авторы выражают признательность А. В. Бурдакову за многочисленные обсуждения и благодарят коллектив установки ГОЛ-3 за совместную работу в эксперименте.

ме 4,8 Тл, в минимуме 3,2 Тл и шагом 22 см. Соленоид оканчивается одиночными магнитными пробками с полем 8–9 Тл. При помощи нескольких импульсных клапанов в металлической вакуумной камере $\varnothing 10$ см, расположенной внутри соленоида, создается требуемое распределение плотности дейтерия по длине. Далее с помощью специального продольного разряда в момент максимума магнитного поля создается предварительная низкотемпературная плазма со средней по длине плотностью $\sim 10^{15}$ см $^{-3}$ и температурой ~ 2 эВ (здесь и далее значения температуры будут приводиться в энергетических единицах, 1 эВ $\approx 11\,600$ К). Затем в эту плазму инжектируется релятивистский электронный пучок со следующими параметрами: энергия электронов $\sim 0,9$ МэВ, ток ~ 25 кА, длительность по основанию ~ 8 мкс, энергосодержание ~ 120 кДж, диаметр пучка ~ 5 см. В результате коллективного нагрева плазма приобретает ионную температуру масштаба 1–2 кэВ (в наиболее горячей части плазменного столба).

Важным фактором, который используется в данной работе, является наличие продольного тока, протекающего по плазме в фазах предварительного разряда и инжекции релятивистского электронного пучка. Ток разряда достигает величины ~ 5 кА, ток электронного пучка имеет встречное по отношению к разрядному току направление и в максимуме составляет ~ 25 кА. Электрическая цепь для полного тока замыкается по стенке вакуумной камеры. Поэтому плазменный шнур и вакуумная камера образуют коаксиальную систему, внутри которой существует азимутальное магнитное поле, создаваемое протекающим по плазме током. Величина этого магнитного поля в конкретной точке вблизи стенки камеры зависит как от амплитуды полного тока, протекающего по плазме, так и от распределения плотности этого тока по сечению плазменного шнура.

В случае, если в плазме существуют регулярные возмущения, измерения азимутального магнитного поля вблизи стенки вакуумной камеры могут дать информацию как о характерных частотах таких возмущений, так и об их пространственной структуре [3]. В последнем случае потребуется провести синхронные измерения массивом однотипных датчиков, расположенных в одном поперечном сечении вакуумной камеры. Номер

максимально обнаружимой азимутальной моды m связан с количеством датчиков n формулой $n = 2m + 1$. Поскольку в первую очередь интересны относительно высокочастотные возмущения медленно изменяющегося азимутального поля, то в качестве датчиков поля удобно применять обычные индукционные катушки, сигнал которых пропорционален производной магнитного поля.

Несмотря на то что по измерениям магнитного поля вне плазмы в принципе невозможно точно восстановить внутреннее распределение тока (это противоречило бы уравнениям Максвелла), подобного рода диагностика используется в установках класса «токамак», где она позволяет достаточно надежно определять регулярные искажения условной «токовой поверхности», по которым можно идентифицировать некоторые плазменные процессы, отвечающие за возникновение искажений. В открытых ловушках такие измерения ранее не проводились.

Целью данной работы является создание прототипа магнитного датчика для многопробочной ловушки ГОЛ-3, проведение первых экспериментов для оценки уровня сигнала и наводок, а также разработка проекта полномасштабной диагностической системы.

Прототип магнитного датчика

Диагностика в законченном виде должна представлять собой набор из нескольких одинаковых измерительных катушек. Для проверки технической возможности создания многоканального помехозащищенного зонда спроектирован его одноканальный прототип, с помощью которого были проверены уровень получаемого сигнала, достаточность мер по экранировке датчика, а также собрана информация о характерных частотах в спектре сигнала.

С точки зрения требований к конструкции детектора следует отметить следующие обстоятельства. Многопробочная ловушка ГОЛ-3 является мощной импульсной установкой с достаточно высоким уровнем электрических наводок. Более того, датчик должен находиться в непосредственной близости от плазмы, которая может принимать потенциал до нескольких киловольт во время инжекции электронного пучка. В качестве мешающего фактора следует учитывать жесткое тормозное излучение мощностью $\sim 0,1$ ГВт,

возникающее при поглощении релятивистского пучка в выходном приемнике. Датчик с двойным электростатическим экраном должен быть смонтирован внутри вакуумной камеры установки так, чтобы габаритное расстояние от стенки камеры не превышало 10 мм.

На рис. 1 представлена конструкция прототипа датчика, разработанная с учетом перечисленных выше требований. Собственно измерительная катушка состоит из 9 витков провода ПЭВ-2, намотанных в один слой на капролоновый каркас диаметром 6 мм. Небольшое число витков обусловлено необходимостью иметь достаточное временное разрешение датчика, а однослойная намотка обеспечивает необходимую точность изготовления катушки с заданной площадью. Первым электромагнитным экраном является тонкостенный медный корпус, который электрически соединен со второй (внешней) дополнительной коаксиальной оплеткой измерительного кабеля. Этот экран имеет продольный разрез в месте, обращенном в сторону вакуумной камеры установки. Разрез устраняет азимутальные вихревые токи, а также используется для вывода сигнальных проводников.

Катушка с экраном расположена с зазором около 0,5 мм над проводящей поверхностью патрубка. Фиксация катушки осуществляется при помощи капролоновых креплений с

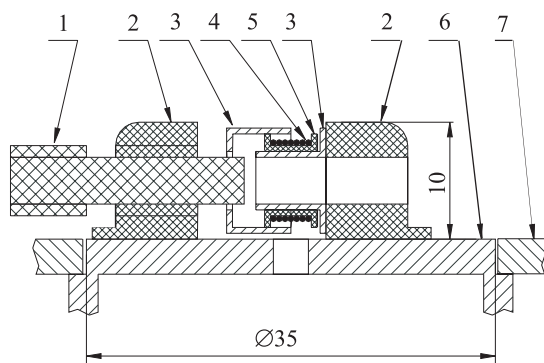


Рис. 1. Конструкция одноканального прототипа магнитного датчика (для наглядности детали представлены в раздвинутом состоянии): 1 – капролоновый центрирующая шпилька; 2 – капролоновые установочные элементы; 3 – наружная и внутренняя половины первого медного электростатического экрана; 4 – измерительная катушка; 5 – капролоновый каркас катушки; 6 – присоединительный патрубок; 7 – вакуумная камера установки ГОЛ-3. Элементы крепления, вакуумные уплотнения, пленочная изоляция, распайка кабеля и внешний заземленный электростатический экран условно не показаны

центрирующей шпилькой, которые, в свою очередь, закреплены на присоединительном патрубке скобками из стали 12Х18Н10Т с использованием точечной сварки. Катушка с экраном изолирована пленкой из фторопласта-4, сверху датчик в сборе дополнительно фиксируется на патрубке при помощи хомута из стали 12Х18Н10Т, выполняющего роль внешнего (второго) электростатического экрана и механической защиты датчика от воздействия плазмы. Один конец экранирующего хомута имеет электрический контакт с патрубком, второй конец изолирован.

Выводы катушки через согласующий резистор подключены к аналого-цифровому преобразователю с помощью экранированного коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 75 Ом. Кабель имеет вторую экранирующую оплетку, соединенную с корпусом установки и с боксом, в котором размещена измерительная электроника. Для снижения наводок от высокочастотных уравнительных токов применяются охватывающие кабель ферритовые кольца, работающие в качестве диссипативного дросселя для уравнительных токов и пропускающие полезный сигнал без искажения. Оцифровка сигнала производится при помощи стандартных для измерительного комплекса установки ГОЛ-3 синхронных аналого-цифровых преобразователей ADC1225 (50 МГц, 12 бит, [4]) и далее записывается в базу данных при помощи штатного программного обеспечения установки.

Результаты экспериментов

После изготовления прототип датчика был установлен в боковой порт вакуумной камеры, расположенный на координате $Z = 579$ см (отсчитывается от центра входной пробки). Для измерения тока, протекающего по плазме, используется набор внутрикамерных поясов Роговского. Далее в работе будут использоваться сигналы ближайшего пояса, расположенного на координате $Z = 533$ см.

До начала экспериментов с плазмой была проведена проверка правильности юстировки датчика относительно магнитной оси соленоида. Измерялся сигнал, наведенный основным магнитным полем соленоида (напомним, что продольное магнитное поле соленоида в месте установки датчика составляет 4,2 Тл, а азимутальное поле тока – масштаба 0,1 Тл). Измерения показали, что

величина такого сигнала близка к весу младшего разряда дискретизации. Этот факт позволяет в дальнейшем наводку от основного поля соленоида не учитывать. До начала экспериментов не было оснований считать принятые меры по защите датчика достаточными. Поэтому для уменьшения риска повреждения регистрирующей электроники в случае возможного электрического пробоя плазмы на измерительную катушку, на сигнальный кабель был установлен симметричный П-образный согласованный коаксиальный делитель напряжения 1 : 10. Этот делитель оставался смонтированным на датчике и в экспериментах с плазмой, обсуждаемых ниже.

В экспериментах с холодной предварительной плазмой ожидалось, что сигнал датчика будет пропорционален производной азимутального магнитного поля, т. е. полного тока, текущего по плазме. На рис. 2 приведено сравнение сигнала магнитного датчика с сигналом пояса Роговского. В целом, действительно, интеграл сигнала магнитного датчика близок к токовому сигналу, однако есть и существенные отличия. Во-первых, в начальной фазе разряда (который начинается в $t = 10$ мкс по шкале времени рис. 2) на сигнале магнитного датчика наблюдаются неперіодические знакопеременные колебания достаточно большой амплитуды. Появление этих колебаний, вероятно, связано с тем, что в начальной фазе разряда ток по плазме протекает неоднородно, существуют «струйки тока», перемещение которых относительно датчика и создает такой эффект. Второе обстоятельство, которое не ожидалось в подобного рода экспериментах, – это возникновение квазипериодических колебаний на сигнале, которые появляются на стадии роста тока незадолго до его максимума. Продольный ток по плазме в эти моменты времени приблизительно в три раза меньше, чем порог развития неустойчивости Крускала – Шафранова. Поэтому появление колебаний азимутального магнитного поля может свидетельствовать либо о том, что уже на стадии предварительного разряда начинается структурирование периферии плазмы (вызванное, например, асимметричным накоплением в периферийной части плазменного шнура десорбированных со стенки примесей, что приводит к локальному охлаждению плазмы и соот-

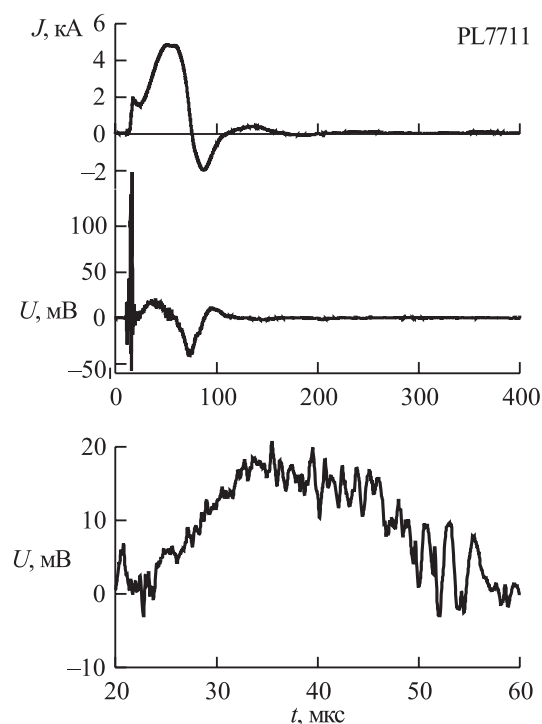


Рис. 2. Сигналы в эксперименте с предварительной плазмой. Сверху вниз: полный ток, текущий по плазме; сигнал прототипа магнитного датчика (полная длительность процесса и фрагмент). Начало предварительного разряда соответствует $t = 10$ мкс

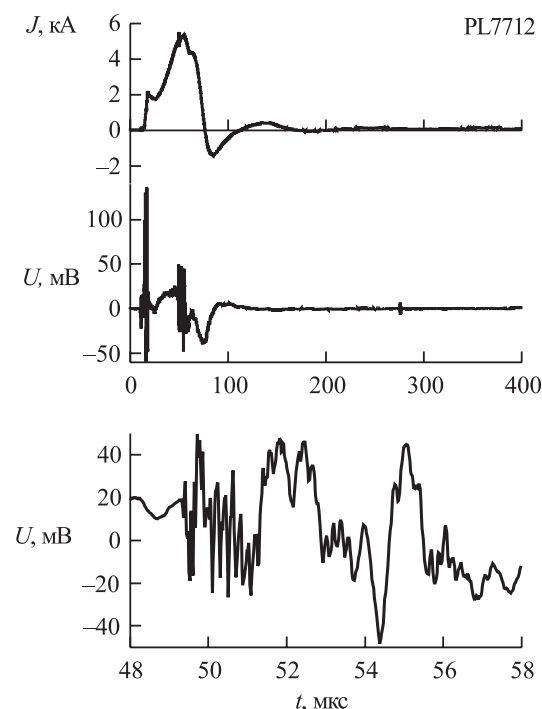


Рис. 3. Сигналы в эксперименте с нагревом плазмы релятивистским электронным пучком. Сверху вниз: полный ток, текущий по плазме; сигнал прототипа магнитного датчика (полная длительность процесса и фрагмент). Начало предварительного разряда соответствует $t = 10$ мкс, начало инжекции пучка в плазму соответствует $t = 49,3$ мкс, длительность пучка около 8 мкс

ветствующей неоднородности проводимости), либо о том, что в плазме возникает неустойчивость другого типа, вызываемая неустановленной причиной. В более поздних стадиях разряда, которые проходят при токе, меньшем 1 кА, плазменный шнур остается относительно стабильным и подобные колебания не наблюдаются.

При инжекции в плазму релятивистского электронного пучка температура плазмы увеличивается приблизительно на три порядка. Возникают и значительные градиенты основных параметров плазмы как в продольном, так и в поперечном направлении. Соответственно можно ожидать появления неустойчивостей различных типов. На рис. 3 представлена подборка сигналов тех же датчиков, что и на рис. 2. Инжекция релятивистского электронного пучка начинается в момент в $t = 49,3$ мкс и продолжается около 8 мкс (к концу импульса энергия электронов и мощность пучка плавно уменьшаются).

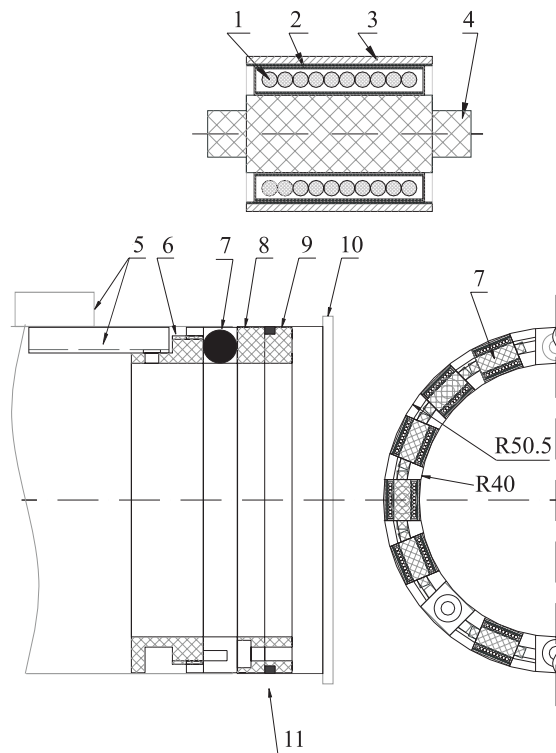


Рис. 4. Конструкция 16-канального магнитного датчика (вверху: отдельная измерительная катушка, внизу: 16-канальный датчик в сборе): 1 – обмотка измерительной катушки; 2, 3 – внешний и внутренний электростатические экраны; 4 – каркас катушки; 5 – кабелепровод и присоединительный патрубков; 6 – прижимная гайка с кабельным каналом; 7 – измерительная катушка; 8 – корпус датчика; 9 – распорное кольцо; 10 – вакуумная камера установки ГОЛ-3; 11 – фиксирующее резиновое кольцо. Элементы крепления, вакуумные уплотнения, пленочная изоляция и распайка кабелей условно не показаны

В результате практически полной компенсации тока электронного пучка обратным током, текущим по периферии плазмы во встречном по отношению к пучку направлении, сигнал полного тока изменяется незначительно во время инжекции пучка (несмотря на то, что ток пучка доходит до ~ 25 кА, т. е. в несколько раз превышает ток предварительного разряда, см. [5]).

Вплоть до начала инжекции электронного пучка сигнал магнитного датчика аналогичен случаю предварительной плазмы. Далее наблюдаются высокочастотные возмущения азимутального поля, которые не проявляются на сигнале пояса Роговского и могут быть связаны с искажением формы токовых поверхностей. Затухающие колебания с периодом около 110 нс, возникающие непосредственно в момент начала инжекции пучка, связаны, вероятно, с отражениями от концов недостаточно точно согласованного измерительного кабеля. Все остальные особенности сигнала какими-либо аппаратными эффектами объяснены быть не могут и связаны с процессами, протекающими в плазме.

Анализ сигнала датчика показывает, что в спектре присутствуют несколько процессов с характерными периодами колебаний от 0,2 до 5 мкс. Более высокочастотные колебания сигнала существуют на стадии инжекции пучка (напомним, что в этот период неравновесность плазмы максимальна), на стадии остывания плазмы их амплитуда уменьшается быстрее, чем у низкочастотных. Частоты колебаний изменяются за время, сравнимое с несколькими периодами. Это является естественным, поскольку как во время инжекции электронного пучка, так и сразу после его окончания существенно изменяются основные параметры плазмы, что должно приводить и к соответствующему изменению частот плазменных процессов.

Конструкция многоканального датчика

Предварительные эксперименты с прототипом магнитного датчика показали, что в целом принятые решения правильны и позволяют переходить к созданию полномасштабной многоканальной системы. Предполагается, что 16-канальный датчик будет смонтирован внутри гладкой части вакуум-

ной камеры с выводом сигнальных кабелей вдоль стенки в ближайший порт. Для многоканальной системы критическим вопросом является одинаковость параметров всех катушек, поэтому, по результатам экспериментов с прототипом, в конструкцию как измерительной катушки, так и электростатических экранов были внесены некоторые изменения.

Конструкция многоканальной системы представлена на рис. 4. Все 16 катушек крепятся на общем диэлектрическом каркасе, который конструктивно обеспечивает фиксацию индивидуальных катушек в требуемом положении и принимает на себя механические усилия, возникающие, в том числе, и в результате возможного в принципе контакта плазмы с датчиком. Электростатические экраны в новой конструкции не несут силовой нагрузки и могут быть изготовлены из медной фольги. Это уменьшает габариты катушки и позволяет разместить второй (заземленный) электростатический экран. После сборки датчика оставшиеся свободные объемы корпуса заполняются эпоксидным компаундом (эта мера должна уменьшить вероятность электрического пробоя плазмы на одну из измерительных катушек). Диагностика устанавливается в вакуумной камере через место стыка секций камеры, после чего фиксируется на месте за счет трения деформируемого резинового кольца, зажимаемого между корпусом зонда, прижимным кольцом и корпусом установки.

В настоящее время ведется изготовление 16-канального датчика. Ожидается, что совместный анализ полученных сигналов с помощью разложения по частотным и пространственным гармоникам позволит вычислить форму эффективной токовой поверхности до седьмой пространственной моды включительно. Изменение этой формы с течением времени позволит получить информацию о процессах, протекающих в плазме.

Заключение

В качестве основных результатов работы можно отметить следующее. Спроектирован и изготовлен одноканальный прототип магнитного датчика для установки ГОЛ-3. Датчик смонтирован на установке, ведется набор экспериментальной информации в штатном режиме. Определены характерные частоты процессов, приводящих к изменению азимутального магнитного поля. Обнаружено, что уже на стадии предварительного разряда токовая поверхность теряет симметрию, что может говорить о возникновении не обнаруживаемой другими методиками неустойчивости периферии плазмы. Выработаны рекомендации по улучшению помехозащищенности и технологичности датчика. Разработана конструкция и ведется изготовление 16-канальной диагностики, которая даст информацию об азимутальных модах искажений токовой поверхности, что позволит начать идентификацию процессов, приводящих к таким искажениям.

Список литературы

1. *Burdakov A., Arzhannikov A., Astrelin V. et al.* Plasma Heating and Confinement in GOL-3 Multi Mirror Trap // *Fusion Science and Technology*. 2007. Vol. 51. No. 2T. P. 106–111.
2. *Будкер Г. И., Мирнов В. В., Рютов Д. Д.* Влияние гофрировки магнитного поля на расширение и остывание плотной плазмы // *Письма в ЖЭТФ*. 1971. Т. 14. С. 320–322.
3. *Мирнов С. В.* Зондовая методика измерения смещения токового шнура в цилиндрической и тороидальной камерах // *Атомная энергия*. 1964. Т. 17. С. 209–211.
4. *Гурко В. Ф., Зубарев П. В., Квашинин А. Н. и др.* Быстродействующая синхронная 32-канальная система сбора данных // *ПТЭ*. 2003. № 5. С. 32–37.
5. *Postupaev V. V., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T. et al.* Role of q-profile for plasma confinement in the multimirror trap GOL-3 // *Transactions of Fusion Science and Technology*. 2005. Vol. 47. No. 1T. P. 84–91.