

УДК 621.039.623

О влиянии ВЧ тока винтовой обмотки на состояние разряда в токамаке ТО-1

АРТЕМЕНКОВ Л. И., ИВАНОВ Н. В., КАКУРИН А. М., ЧУДНОВСКИЙ А. Н.

В последние годы возрос интерес к изучению возможности стабилизации винтовых неустойчивостей плазменного шнура в токамаке с помощью системы обратной связи [1—9]. Данная работа содержит результаты первого этапа таких исследований, выполненных на токамаке ТО-1. На этом этапе изучалось влияние тока заданной частоты, протекающего по винтовой обмотке в камере ТО-1, на состояние разряда, причем главное внимание уделялось зондовым измерениям возмущений полоидального магнитного поля у стенки камеры.

Токамак ТО-1 является установкой относительно небольших размеров и обладает определенной спецификой: в ней нет проводящего кожуха и вместо него для поддержания плазменного шнура в равновесии используется система управляющих обмоток [10]. Вакуумная камера, изготовленная из нержавеющей стали толщиной 1 мм, имеет большой и малый радиусы

60 и 18 см соответственно. Радиус диафрагмы 12,5 см.

Винтовая обмотка ТО-1 (рис. 1) представляет винтовую квадруполь с $m = 2$, $n = 1$ с левым вращением. Обмотка состоит из четырех плоских шин из нержавеющей стали, укрепленных внутри камеры на одной четверти вдоль по ее обходу. Шины толщиной 3 мм и шириной 50 мм размещены в тени диафрагмы на расстоянии 35 мм от стенки камеры и не изолированы от плазмы диэлектриком.

Как показали эксперименты, никаких эффектов шунтирования неизолированной винтовой обмотки через плазму при частотах 1—200 кГц, различных амплитудах тока обмотки и режимах разрядного импульса токамака не наблюдается. Опасность шунтирования была связана с возможным присутствием в тени диафрагмы плазмы относительно высокой концентрации, которая в принципе может обладать достаточно большой проводимостью и диэлектрической проницаемостью. При более высоких частотах (десятки мегагерц) эффект шунтирования неизолированного проводника пристеночной плазмой токамака обнаруживался экспериментально [11].

Основная часть работы выполнена на водороде при начальном давлении газа в камере $8 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Напряженность тороидального магнитного поля варьировалась в пределах от 4 до 8 кЭ. При этом ток разряда длительностью 100—150 мс имел прямоугольную временную форму амплитудой 15 кА.

В заданный момент времени относительно начала разрядного импульса токамака в винтовой обмотке с помощью внешнего контура возбуждался пук из 10—15 периодов затухающих колебаний тока частотой 20 кГц и начальной амплитудой до 1,5 кА. Возбуждение тока в винтовой обмотке сопровождалось появлением сигналов магнитных зондов, регистрирующих переменное магнитное поле у стенки камеры. Магнитные зонды располагались в двух сечениях камеры, обозначенных на рис. 1 цифрами I и II. Они предназначались для пространственного гармонического анализа возмущения магнитного поля в данных сечениях и представляли наборы из четырех катушек, которые наматывались на кольцевой каркас, охватывающий плазменный шнур. Плотность намотки витков каждой из

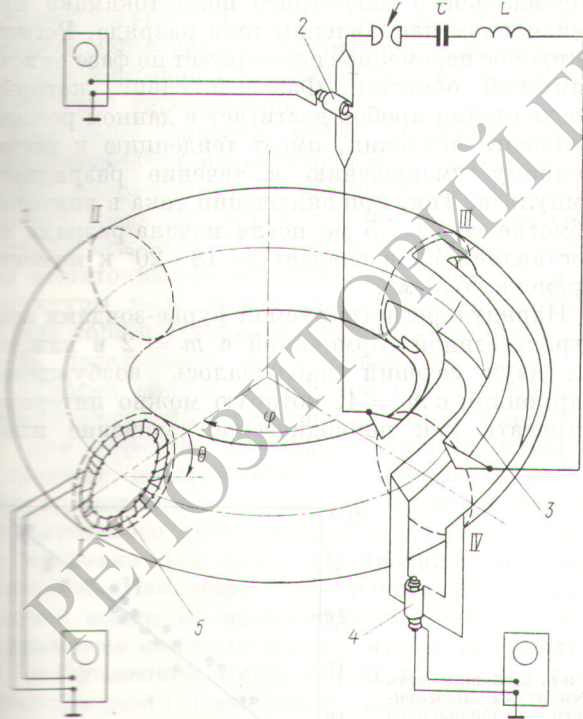
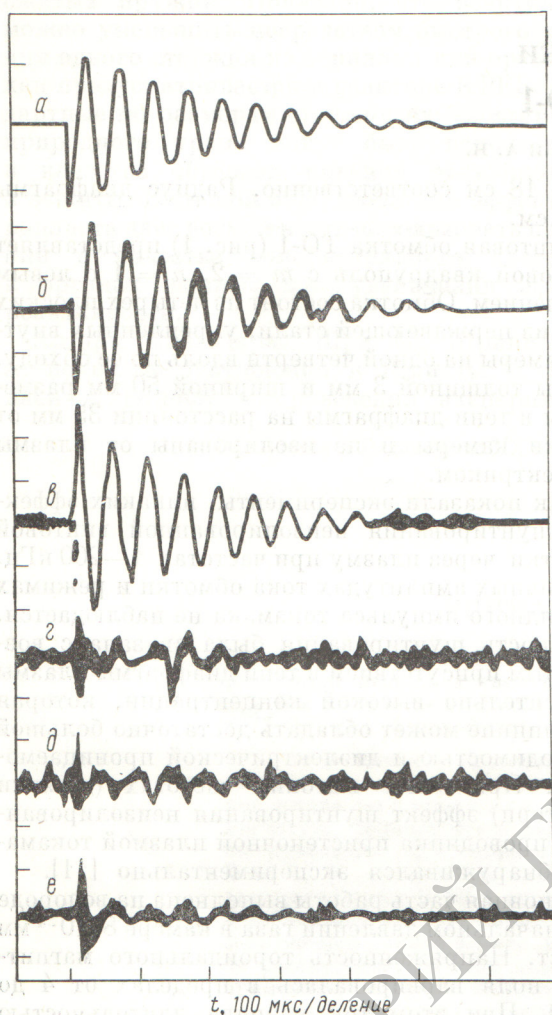


Рис. 1. Принципиальная схема размещения винтовой обмотки и магнитных зондов в камере токамака ТО-1:

1 — продольная камера; 2, 4 — датчики тока винтовой обмотки; 3 — винтовая обмотка; 5 — магнитный фурье-зонд



Р и с. 2. Осциллограммы производной тока винтовой обмотки (а), сигналов локального магнитного зонда (б) и фурье-зондов с $m = 2$ (с), $m = 3$ (д), $m = 4$ (е), $m = 5$ (е) в первом сечении камеры [чувствительность производной тока 10^3 А/с, зондов — $2 \cdot 10^6$ Э/с в делении]

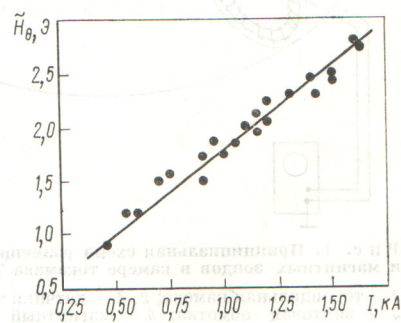
катушек менялась вдоль каркаса по гармоническому закону, пропорционально $\sin m(\theta - \theta_0)$, где $m = 2, 3, 4, 5$, причем конструкция зондов позволяла произвольно изменять фазу намотки θ_0 . Кроме фурье-зондов, в тех же сечениях тороидальной камеры имелись локальные зонды, которыми можно было регистрировать распределения полоидальной и тороидальной компонент переменного магнитного поля у стенки камеры вдоль малого обхода тора.

Характер отклика магнитных зондов на появление тока в винтовой обмотке качественно зависел от режима разрядного импульса токамака, точнее — от коэффициента запаса устой-

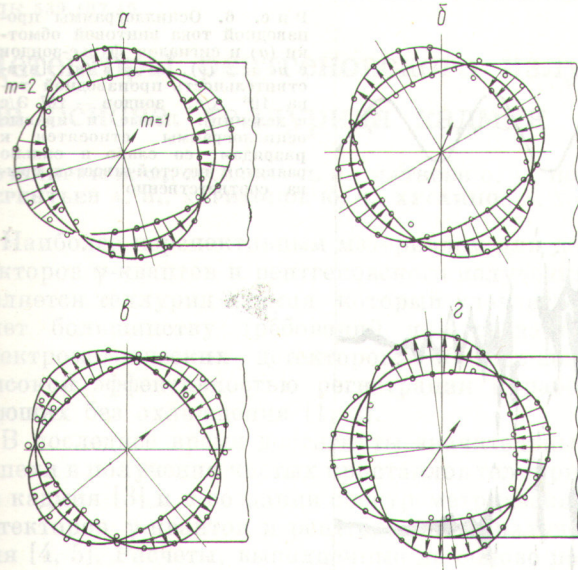
чивости q . При сравнительно большом его значении ($q \geq 6$ по диафрагме) осциллограммы сигналов локальных магнитных и фурье-зонда с $m = 2$, показанные на рис. 2, представляли затухающие колебания, похожие по форме на осциллограмму сигнала датчика тока в винтовой обмотке, причем регистрируемое переменное магнитное поле имело только полоидальную компоненту. Его амплитуда линейно росла с увеличением амплитуды тока винтовой обмотки (рис. 3). В то же время в данном режиме разряда включение ВЧ импульса тока винтовой обмотки не приводило к существенному изменению временного хода сигналов фурье-зондов с m , равным 3, 4, 5.

Сравнительный анализ сигналов магнитных зондов в двух сечениях камеры токамака показал, что возбуждаемое переменное магнитное поле имеет структуру стоячей волны, характеризующуюся постоянством фазы и периодическим изменением амплитуды колебаний вдоль малого обхода тора (рис. 4). Геометрическое положение узлов и пучностей возбуждаемой стоячей волны в каждом из двух сечений сохраняется неизменным для различных разрядных импульсов и зависит только от направления тороидального магнитного поля токамака при неизменном направлении тока разряда. Регистрируемое переменное поле отстает по фазе от тока винтовой обмотки. Фазовый сдвиг, который после стадии пробоя достигает в данном режиме большого значения, имеет тенденцию к постепенному уменьшению в течение разрядного импульса. Так, при включении тока в винтовой обмотке через 7,5 мс после начала разряда он составляет 40° и спадает до $18-20^\circ$ к моменту времени 57,5 мс.

Наряду с регистрируемой фурье-зондами пространственной гармоникой с $m = 2$ в каждом из двух сечений наблюдалось возбуждение гармоник с $m = 1$, которую можно интерпретировать как периодическое смещение плаз-



Р и с. 3. Зависимость амплитуды переменного полоидального магнитного поля у стенки камеры токамака от амплитуды ВЧ тока винтовой обмотки



Р и с. 4. Пространственные структуры гармоник с $m = 1$ и $m = 2$ переменного магнитного поля при двух противоположных направлениях вращательного преобразования магнитного поля токамака:

левое, совпадающее с направлением вращения винтовой обмотки, — в первом (а) и втором (б) сечениях камеры; правое — в первом (в) и втором (г) сечениях камеры

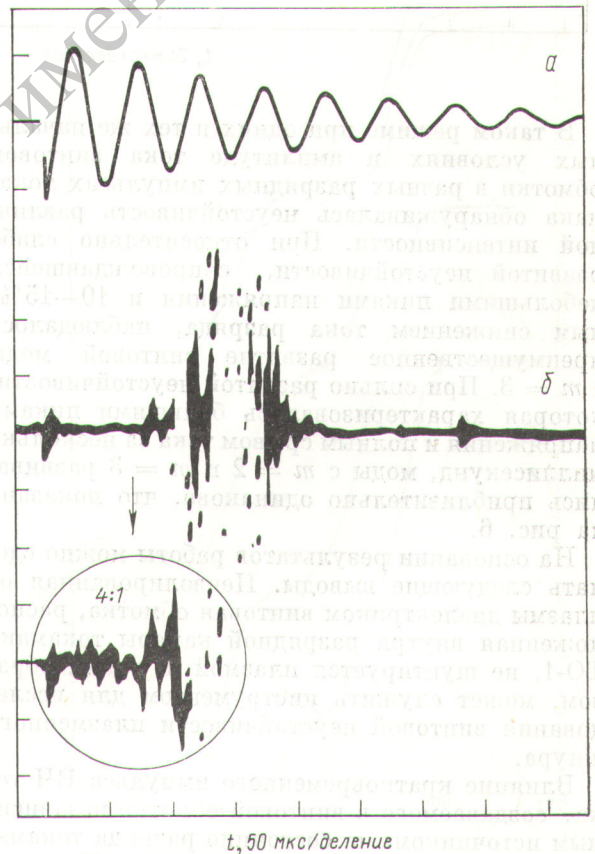
менного шнура под действием поперечной компоненты переменного магнитного поля, создаваемого винтовой обмоткой в камере токамака вследствие тороидальности.

Как было сказано выше, применявшиеся в экспериментах магнитные зонды размещались только в двух сечениях камеры токамака, удаленных друг от друга на 90° относительно главной оси тора. Поэтому в настоящее время нет достаточных данных для подробного анализа структуры поля возмущения вдоль большого обхода тора и авторы вынуждены ограничиться лишь отдельными замечаниями.

Согласно рис. 4, положение узлов и пучностей стоячей волны возмущения с $m = 2$ меняется при переходе от одного сечения камеры к другому, поворачиваясь на некоторый угол, причем этот поворот совпадает с направлением вращательного преобразования магнитного поля токамака для двух его противоположных значений. Изменение пространственной фазы стоячей волны на одной четверти обхода тора оказывается слишком малым, чтобы объясняться возбуждением лишь одной винтовой пространственной гармоники, и, по-видимому, указывает на возбуждение нескольких гармоник, имеющих различные тороидальные волновые числа. Следует отметить, что этот вывод не

является неожиданным, поскольку винтовая обмотка ТО-1 имеет ограниченные размеры по обходу тора и наряду с гармоникой $n = 1$ может обладать эффективной связью с другими тороидальными пространственными гармониками.

При меньшем коэффициенте запаса устойчивости ($q \approx 4$ на диафрагме) ВЧ импульс тока винтовой обмотки приводил к возбуждению в плазме винтовой неустойчивости. Она проявлялась в резком нарастании амплитуды возмущения полоидального магнитного поля до нескольких десятков эрстед (рис. 5). При этом фурье-зонды регистрировали одновременно несколько пространственных гармоник возмущения магнитного поля, имеющих частоты, отличающиеся от частоты тока винтовой обмотки. Возбуждение винтовой неустойчивости сопровождалось появлением отрицательных и положительных пиков напряжения и срывами тока разряда токамака.



Р и с. 5. Осциллограммы производной тока винтовой обмотки (а) и сигнала локального магнитного зонда (б) [чувствительность производной тока 10^8 А/с, зонда — $5 \cdot 10^6$ Э/с в делении]

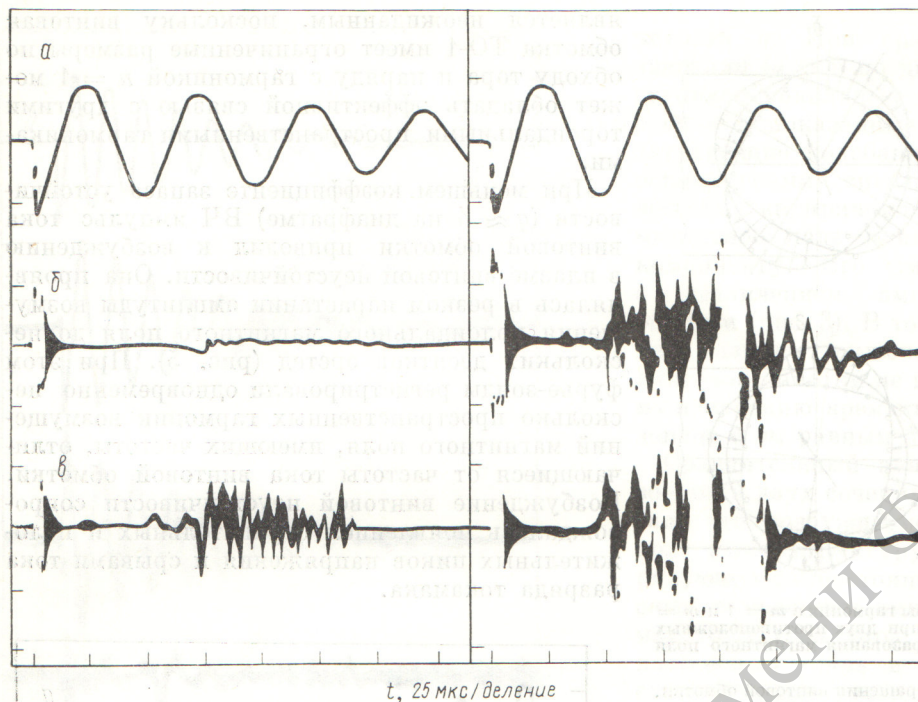


Рис. 6. Осциллограммы производной тока винтовой обмотки (а) и сигналов фурье-зондов с $m = 2$ (б), $m = 3$ (в) [чувствительность производной тока 10^8 А/с; зондов — 10^7 Э/с в делении]. Левые и правые осциллограммы относятся к разрядам со слабо и сильно развитой неустойчивостью срыва соответственно

В таком режиме при одних и тех же начальных условиях и амплитуде тока винтовой обмотки в разных разрядных импульсах токамака обнаруживалась неустойчивость различной интенсивности. При относительно слабо развитой неустойчивости, сопровождавшейся небольшими пиками напряжения и 10–15%–ным снижением тока разряда, наблюдалось преимущественное развитие винтовой моды с $m = 3$. При сильно развитой неустойчивости, которая характеризовалась большими пиками напряжения и полным срывом тока за несколько миллисекунд, моды с $m = 2$ и $m = 3$ развивались приблизительно одинаково, что показано на рис. 6.

На основании результатов работы можно сделать следующие выводы. Неизолированная от плазмы диэлектриком винтовая обмотка, расположенная внутри разрядной камеры токамака ТО-1, не шунтируется плазмой и, таким образом, может служить инструментом для исследования винтовой неустойчивости плазменного шнура.

Влияние кратковременного импульса ВЧ тока, создаваемого в винтовой обмотке независимым источником, на состояние разряда токамака зависит от запаса устойчивости q . При $q \approx 6$ –8 включение ВЧ тока приводит к возбуждению возмущения полоидального магнитного

поля, имеющего пространственную структуру стоячей волны и частоту, совпадающую с частотой тока в винтовой обмотке. При $q \approx 4$ то же воздействие приводит к развитию сильной винтовой неустойчивости и срыву разряда.

Поступила в Редакцию 2/VII 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов А. И., Соловьев Л. С. ЖТФ, 1964, т. 34, с. 1566.
2. Арсенин В. В., Чуянов В. А. «Атомная энергия», 1968, т. 25, вып. 25, с. 141.
3. Арсенин В. В. Там же, 1970, т. 28, вып. 28, с. 141.
4. Арсенин В. В. Там же, 1972, т. 33, вып. 33, с. 691.
5. Ладиков-Роев Ю. П., Самойленко Ю. М. ЖТФ, 1972, т. 47, с. 2062.
6. Lowder R., Thomassen K. «Phys. Fluids», 1973, v. 16, p. 1497.
7. Hugill J. «Plasma Physics», 1974, v. 16, p. 1200.
8. Bol K. e. a. In: Proc. of Five Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Research. Tokyo, 1974. IAEA, Vienna, 1975, v. I, CN-33/A 4-2.
9. Karger F. e.a. Ibid., CN-33/PD-2.
10. Артеменков Л. И. и др. In: Proc. of Fourth Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Research. Madison, 1971. IAEA, Vienna, 1971, v. I, CN-28/C-3.
11. Иванов Н. В., Кован И. А. In: Proc. of Five Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Research. Tokyo, 1974. IAEA, Vienna, 1975, v. I, CN-33/A 9-5.