

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО СТАБИЛИЗАЦИИ ВИНТОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ТО-1 ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

*Л.И.Артеменков, Н.В.Иванов, А.М.Какурин,  
П.А.Мухин, Л.Н.Папков, А.Н.Чудновский,  
Н.Н.Швиндт  
Ю.В.Гвоздков, М.Ю.Черкашин*

Настоящая работа посвящена первым экспериментам по стабилизации винтовой неустойчивости плазменного шнура в токамаке ТО-1 методом обратных связей [1 - 9].

Токамак ТО-1 имеет следующие основные параметры. Большой и малый радиусы разрядной камеры, изготовленной из листовой нержавеющей стали толщиной 1 мм, составляют 60 и 18 см. Радиус отверстия молибденовой диафрагмы - 12,5 см. Внутри разрядной камеры в тени диафрагмы размещена винтовая обмотка, имеющая пространственную структуру  $m = 2$ ,  $n = 1$  [10]. Обмотка состоит из четырех плоских шин шириной 5 см, изготовленных из нержавеющей стали и закрепленных на изоляторах на расстоянии 3,5 см от стенки камеры. Обмотка не охватывает всей разрядной камеры токамака по большому обходу и занимает одну ее четверть между двумя из четырех сечений с диагностическими патрубками. Для питания винтовой обмотки используется ламповый усилитель, позволяющий развивать в обмотке ток амплитудой до 1 кА в полосе частот от 5 до 2000 кГц. Усилитель работает в импульсном режиме с длительностью импульса 12 мсек. Через патрубок установки, удаленной от винтовой обмотки на угол  $90^\circ$  относительно главной оси тора, в камеру введены магнитные зонды для диагностики ВЧ возмущений полоидального магнитного поля в тени диафрагмы и использования в качестве датчиков в цепи обратной связи.

Эксперименты проводились на водороде при напряженностях тороидального магнитного поля от 4 до 8 кэ. Определяемая внешними цепями временная форма импульса разрядного тока была близка к прямоугольнику длительностью 70 мсек и амплитудой  $I \approx 20$  кА.

Работе с обратной связью предшествовал эксперимент, в котором ламповый усилитель возбуждался от независимого свипгенератора, частота которого менялась за время 4 мсек по линейному закону от 50 до 5 кГц. При этом, анализируя возникающий на магнитном зонде ВЧ сигнал, можно было судить об амплитудной и фазовой характеристиках, возникающих в плазме колебаний, когерентных с током по винтовой обмотке. Без плазмы сигнал на магнитном зонде отсутствовал.

Оказалось (см. рис. 1), что формы частотных характеристик зависят от напряженности тороидального магнитного поля  $H_0$ . В случае  $H_0 =$

$= 8 \text{ кэ}$ ,  $I = 21 \text{ ка}$  ( $q = 5,0$  на диафрагме) эти характеристики не имеют особенностей, т.е. амплитуда и фаза сигнала с зонда слабо зависят от частоты тока в винтовой обмотке. При этом по своей пространственной структуре возникающее ВЧ возмущение полоидального магнитного поля представляет собой стоячую волну  $m = 2$  (см. также [ 10 ]).

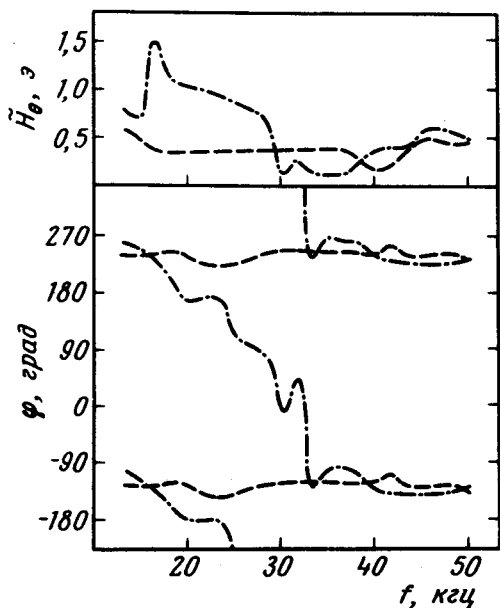


Рис. 1. Частотные зависимости амплитуды и фазы (по отношению к току в винтовой обмотке) колебаний полоидального магнитного поля у стенки камеры. Пунктирные кривые соответствуют режиму разряда при  $H_0 = 8 \text{ кэ}$ , штрих-пунктирные —  $H_0 = 5,8 \text{ кэ}$ . Амплитуда тока в винтовой обмотке  $300 \text{ а}$

В меньших полях  $H_0 = 5,8 \text{ кэ}$ ,  $I = 21 \text{ ка}$  ( $q = 3,6$ ), как видно на рис. 1, на частотах в диапазоне от 15 до 35 кГц наблюдается появление резонанса, которое заключается в увеличении амплитуды колебаний и возникновении сильной зависимости фазы от частоты в пределах этого диапазона. Следует отметить, что частоты МГД активности, обычно наблюдаемые в токамаке ТО-1 в макроскопически неустойчивых режимах разряда, также лежат в пределах от 15 до 35 кГц.

В эксперименте с обратной связью магнитный зонд подключался на вход питающего винтовую обмотку ВЧ усилителя. В данном случае зонд представлял собой локальную многовитковую катушку и, поэтому, в отличие от описанных в [ 10 ] фурье-зондов, имел одинаковую связь со всеми пространственными гармониками длинноволновых возмущений магнитного поля. Он размещался в тени диафрагмы у стенки камеры токамака в точке, соответствующей узлу стоячей волны. Между зондом и усилителем подключались частотнезависимый фазовращатель и самонастраивающийся узкополосный фильтр. Фильтр служил для устранения паразитных возбуждений в цепи обратной связи. Из частотного спектра сигнала с магнитного зонда фильтр выделял гармонику, имеющую наибольшую амплитуду, причем частота пропускания фильтра автоматически перестраивалась при изменении спектрального состава сигнала.

Для эксперимента с обратной связью был выбран режим разряда токамака с  $H_0 = 5,1 \text{ кэ}$ ,  $I = 19 \text{ ка}$  ( $q = 3,5$ ) и подпуском нейтрального га-

за в камеру в процессе разрядного импульса. Этот режим характеризуется развитой МГД активностью моды  $m = 2$ , амплитуда которой мало меняется во времени.

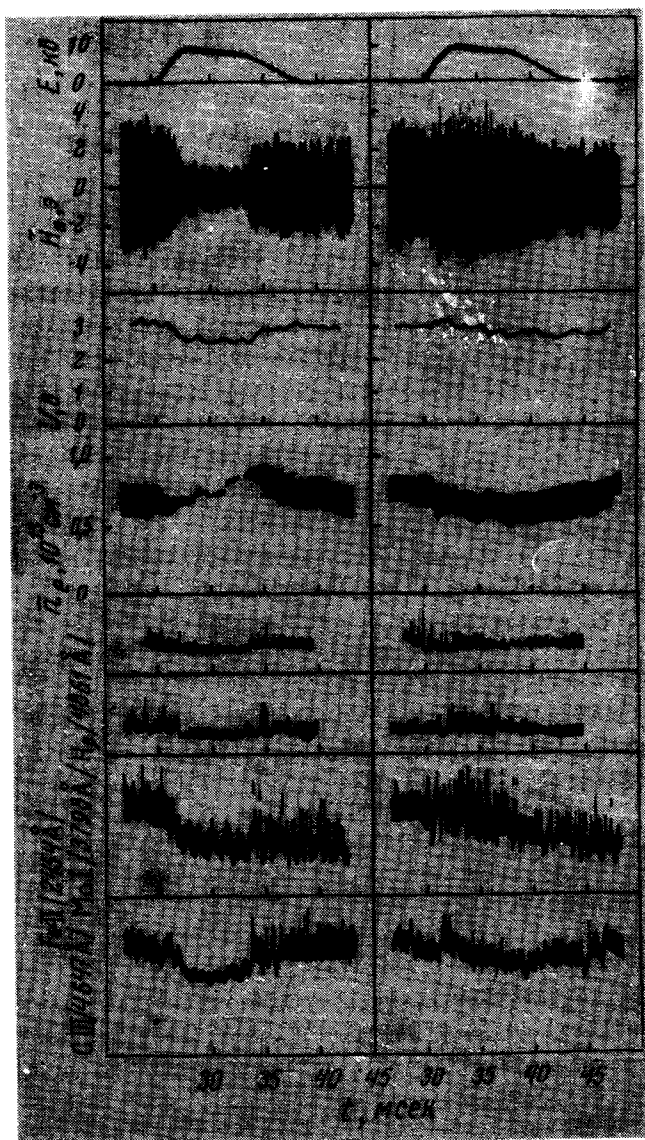


Рис. 2. Наборы осциллограмм напряжения анодного питания усилителя, сигнала с магнитного зонда, напряжения разряда, усредненной на диаметр диафрагмы концентрации плазмы и интенсивностей спектральных линий водорода и примесей при двух взаимно противоположных значениях фазы в цепи обратной связи

На рис. 2 приведены наборы типичных осциллограмм сигналов с магнитного зонда и ряда характеристик плазмы при двух взаимно противоположных значениях фазы в цепи обратной связи. Из рисунка видно, что в зависимости от фазы наблюдается уменьшение или возрастание амплитуды сигнала с магнитного зонда. Уменьшение амплитуды сопровождается снижением напряжения разряда, подъемом концентрации плазмы и изменениями интенсивностей излучения ряда спектральных линий. Наблюдаемое поведение характеристик плазмы свидетельствует об улучшении ее удержания и ослаблении взаимодействия с диафрагмой и стенкой разрядной камеры.

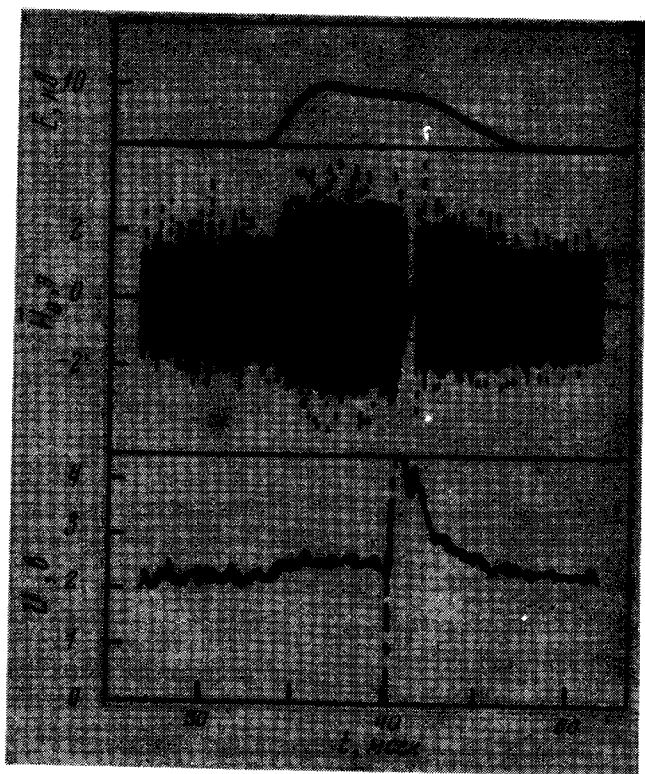


Рис. 3. Возбуждение неустойчивости срыва под действием обратной связи

При другой фазе раскачка сигнала приводит к противоположным изменениям характеристик плазмы. Более того, при достаточно большом коэффициенте усиления в цепи обратной связи рост МГД активности сопровождается появлением отрицательных пиков напряжения разряда,

характерных для неустойчивости срыва (см. рис.3). Последний результат является еще одним аргументом в пользу предположения о причинной связи между винтовой неустойчивостью и неустойчивостью срыва и позволяет надеяться на возможность применения обратных связей для борьбы с этими двумя неустойчивостями одновременно.

Подводя итог, можно сказать, что винтовая неустойчивость оказывается чувствительной к взаимодействию системы обратной связи в относительно простом ее исполнении. Для стабилизации моды  $m = 2$  достаточно использовать одноканальную систему с локальным датчиком и винтовой обмоткой, охватывающей лишь небольшую часть плазменного шнура по большому обходу тора. Совершенствование системы стабилизации и дальнейшее изучение ее влияния на устойчивость плазмы и ее параметры составят предмет нашей дальнейшей работы.

Авторы благодарны акад. Б.Б.Кадомцеву, И.Н. Головину, В.В.Арсенину, В.А.Чуянову, С.В.Мирнову, А.Г.Кирову за интерес к работе и полезные обсуждения, а также Л.И.Молоткову, А.Н.Силаеву за помощь в оптических измерениях.

Поступила в редакцию  
9 декабря 1977 г.

## Литература

- [1] А.И.Морозов, Л.С.Соловьев. ЖТФ, **34**, 1566, 1964.
- [2] В.В.Арсенин, В.А.Чуянов. АЭ, **25**, 141, 1968.
- [3] В.В.Арсенин. АЭ, **28**, 141, 1970.
- [4] В.В.Арсенин. АЭ, **33**, 691, 1972.
- [5] Ю.П.Ладиков-Роев, Ю.М.Самойленко. ЖТФ, **47**, 2062, 1972.
- [6] R.Lowder, K.Thomassen. Phys. Fluids, **16**, 1497, 1973.
- [7] J.Hugill. Plasma Physics, **16**, 1200, 1974.
- [8] K.Bol e.a. In: Proc of Fifth Intern. Conf. of Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Research. Tokyo, 1974. IAEA, Vienna, 1975, v.I, CN-33/A4-2
- [9] Р.А.Демирханов, А.Г.Киров, Л.Ф.Ручков, А.В.Сукачев, В.Б.Майбуров, А.В.Нюшков. Письма в ЖЭТФ, **26**, 89, 1977.
- [10] Л.И.Артеменков, Н.В.Иванов, А.М.Какурин, А.Н.Чудновский. АЭ, **42**, 387, 1977.