

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ТОКОВЫХ МГД НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ТОРОИДАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА МЕТОДОМ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

*Р.А.Демирханов, А.Г.Киров, Л.Ф.Ручко,  
А.В.Сукачев, В.Б.Майбуров, А.В.Нюшков*

Проведены эксперименты по стабилизации винтовой неустойчивости с помощью системы обратных связей на трехзаходном стеллараторе с омическим нагревом Р-0. Показано, что введение системы обратных связей позволяет преодолевать порог развития неустойчивости  $m = 2$  и удерживать плазменный шнур в новом устойчивом состоянии.

Экспериментально показано, что введение системы стабилизации обратными связями позволяет повысить устойчивость тороидального плазменного шнура при малых значениях коэффициента запаса устойчивости  $q$  и улучшить параметры плазмы.

Один из путей оптимизации токамака – стабилизация токовых МГД неустойчивостей с целью достижения малых  $q \approx 1$ . Возможность динамической стабилизации токовых МГД неустойчивостей при малых  $q$  в том числе неустойчивости "срыва", ВЧ магнитными полями показана на установках Р-0 и РТ-4 [1, 2]. ВЧ стабилизация широкополосна, т.е. одновременно обеспечивает стабилизацию большого числа мод, но она требует относительно больших затрат ВЧ мощности. Динамическое управление устойчивостью плазмы обратными связями требует малых мощностей, однако, этот метод узкополосен. Эффективное подавление же лобковых возмущений в пробкотроне электростатической системой обратных связей показано Чуяновым и сотрудниками [3]. Экспериментальная демонстрация эффекта динамического управления МГД устойчивостью плазмы в тороидальной ловушке, приводящая к оптимизации токового разряда, до настоящего времени проведена не была.

Эксперименты по стабилизации винтовой неустойчивости проводились на трехзаходном стеллараторе с токовым омическим нагревом Р-0 [1]. Кварцевая камера,  $D = 100$  см,  $d = 10$  см, тороидальное магнитное поле  $B_0 \leq 8$  кГс, угол вращательного преобразования  $i_0 \leq 1,6\pi$ , ток в плазме длительностью  $\tau \approx 0,8$  мсек и величиной  $I_p \leq 1,5$  кА возбуждался с помощью воздушного трансформатора. Как известно, для ста-

билизации винтовой неустойчивости необходимо, чтобы система обратной связи обладала определенными частотными характеристиками и коэффициентом усиления [4, 5]. Для проведения экспериментов по стабилизации винтовой неустойчивости была разработана шестиканальная система обратной связи, включающая в себя три пары винтовых обмоток с  $m = 1, 2, 3$ ;  $n = 1$ , корректирующие усилители и оконечные мощные усилители тока. Каждая пара винтовых обмоток состоит из "синусной" и "косинусной" сдвинутых друг относительно друга на угол  $\pi/2$  вдоль большого азимута тора. В корректирующих усилителях была предусмотрена возможность суммирования сигналов с "синусной" и "косинусной" обмоток с различным весом. Оконечные усилители обеспечивали ток  $15 \text{ а}$  в индуктивной нагрузке  $10 \text{ мкГ}$  в частотном диапазоне  $100 \text{ кГц} - 1,5 \text{ мГц}$ .

В нестабилизированном режиме протекание тока в плазме сопровождалось развитием винтовой неустойчивости. Были проведены эксперименты по идентификации мод винтовой неустойчивости, позволившие определить области значений коэффициента запаса устойчивости  $q_{\Sigma}(q_{\Sigma} = 2\pi/(i_o + i_j))$ , при которых происходит развитие винтовых мод с  $m = 1, 2, 3$ ;  $n = 1$  [6]. Полученные данные в целом хорошо совпадали с выводами теории [7]. Однако, было обнаружено, что развитие основной неустойчивой моды, например,  $m = 2$ , сопровождается также развитием колебаний с модами  $m = 1, 3$ , имеющих меньшую амплитуду. Из экспериментов по идентификации также следует, что возмущения магнитного поля во время развития неустойчивости имеют отличную от нуля фазовую скорость по большому и малому азимуту. Это позволяло вводить пространственный фазовый сдвиг и изменять фазовые характеристики системы обратной связи.

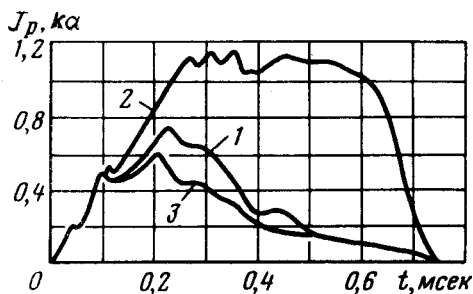


Рис. 1. Зависимость  $J_p(t)$  ( $i_o \approx 0,8\pi$ ,  $B_o \approx 4,3 \text{ кГс}$ ): 1) обратная связь (ОС) выключена; 2) ОС включена,  $\Delta\phi \approx 70^\circ$ ; 3) ОС включена,  $\Delta\phi \approx 230^\circ$

Для активного воздействия на плазму была выбрана мода  $m = 2$ . Когда система обратной связи была выключена, то при увеличении тока в плазме до величин, соответствующих коэффициенту запаса устойчивости  $q_{\Sigma} \approx 2$ , происходило развитие винтовой неустойчивости с основным  $m = 2$ , рост тока прекращался и наблюдались интенсивные колебания макроскопических параметров разряда (рис. 1, осциллограмма 1). Включение системы обратной связи позволило повысить устойчивость разряда. При этом происходило значительное увеличение амплитуды и длительности тока (рис. 1, осциллограмма 2) и проводимости плазмы. В стабилизированном режиме был достигнут коэффициент запаса устойчивости  $q_{\Sigma} \approx 1,5$ . Одновременно с увеличением тока в 5 – 10 раз умень-

шалась амплитуда винтовых колебаний с  $m = 1, 2, 3$ . Присутствие в стабилизированном режиме регулярных винтовых колебаний малой амплитуды можно объяснить ограничением частотной характеристики регуляторов в области низких частот. Это, в частности, следует из предварительного анализа дисперсионного уравнения для винтовых мод в идеально проводящей плазме в присутствии системы обратной связи.

Было исследовано влияние на эффект стабилизации пространственного фазового сдвига  $\Delta\phi$ . Зависимость относительного изменения тока в плазме  $\Delta J_p / J_p$  от  $\Delta\phi$  при коэффициенте усиления  $k \approx 1$  приведена на рис. 2. Эффект дестабилизации при неоптимальном фазовом сдвиге показан на рис. 1 (осциллограмма 3).

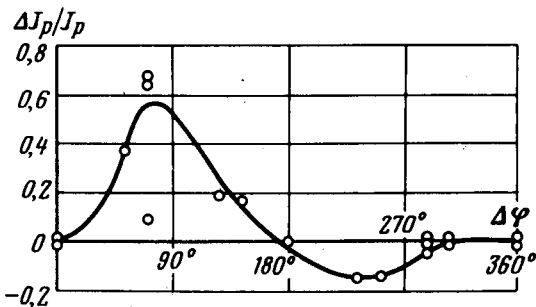


Рис. 2. Зависимость относительного изменения амплитуды тока в плазме от пространственного фазового сдвига

Для того, чтобы ответить на вопрос, исчерпывается ли эффект воздействия системы обратной связи облегчением прохождения через порог развития неустойчивости на фронте тока или же она необходима для поддержания плазменного шнура в новом устойчивом состоянии, производилось быстрое выключение обратной связи после достижения током максимального значения (рис. 3). Видно, что это приводит к спадаанию тока в плазме до нестабилизированной величины. Одновременно происходит резкое возрастание амплитуды винтовых колебаний с  $m = 1, 2, 3$ .

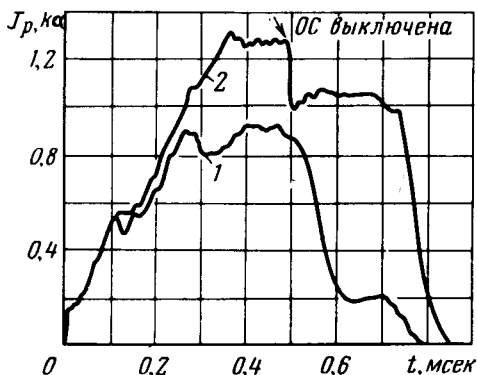


Рис. 3. Зависимость  $J_p(t)$  ( $i_0 \approx 0,9\pi$ ,  $V_0 \approx 4,7$  кВ): 1) ОС выключена; 2) ОС выключена в момент времени, указанный стрелкой

Таким образом, эксперименты показали, что введение системы стабилизации обратными связями с соответствующими фазовыми характеристиками позволяет повысить устойчивость и оптимизировать токовый разряд в тороидальной системе. При этом токи в управляющих обмотках составляют  $J_{упр} < 10^{-2} J_p$ .

В заключение считаем своим долгом выразить благодарность А.М.Абзианидзе и группе энергопитания за бесперебойное обеспечение проведения экспериментов.

Поступила в редакцию  
14 июня 1977 г.

### Литература

- [1] Р.А.Демирханов, А.Г.Киров, В.Н.Жариков, Н.И.Малых, Л.Ф.Ручко, В.А.Жданов. Письма в ЖЭТФ, **17**, 397, 1973.
  - [2] R.A.Demirkhanov et al. 6-th Europ. Conf. on Nucl.Fusion and Plasma Phys., **1**, 169, Moscow, 1973.
  - [3] V.A.Znil'tsov et al. 5-th Int. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res., **1**, 355, Tokyo, 1974.
  - [4] Ю.П.Ладиков, Ю.И.Самойленко. ЖТФ, **42**, 2062, 1972.
  - [5] В.В.Арсенин. Атомная энергия, **33**, 691, 1972.
  - [6] Р.А.Демирханов и др. Доклад на Советско-американском семинаре по динамической стабилизации высокотемпературной плазмы. Сухуми, 1975. Препринт СФТИ-4, Сухуми, 1976.
  - [7] В.Д.Шафранов. ЖТФ, **40**, 241, 1970.
-