

УДЕРЖАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА В ТОКАМАКЕ ТО-1  
СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯЛ. И. Артеменков, П. И. Козлов, П. И. Мелихов,  
П. А. Мухин, Л. Н. Папков

На токамаке ТО-1 без кожуха с удержанием плазменного шнура в равновесии системой автоматического управления экспериментально изучались основные характеристики разряда. Наблюдаются три стадии разряда: макронеустойчивая, "свободного" движения и стадия контакта с диафрагмой. Длительность разряда и энергосодержание плазмы возрастают с увеличением эквивалентной постоянной времени управляющей обмотки.

На токамаке ТО-1 для удержания плазменного шнура в равновесии по большому радиусу используется импедансная система автоматического регулирования [1]. Эта система, а также основные характеристики установки и предварительные результаты экспериментов представлены в докладе на IV международной конференции по термоядерному синтезу [2].

Сделанный в докладе вывод о работоспособности системы регулирования основывался на существенном улучшении основных макроскопических характеристик разряда при включенных регуляторах. В режиме работы с выключенными регуляторами управляющая обмотка, собственная постоянная времени которой 16 — 18 мсек, замыкалась накоротко. С включенными регуляторами эквивалентная постоянная времени управляющей обмотки  $\tau_3$  может изменяться в широких пределах и достигать значений 1 — 2 сек и более. Заметим, что теплый медный кожух с такой же постоянной времени должен иметь толщину в несколько десятков сантиметров.

Принципиальной особенностью системы регулирования является ее свойство усиливать индуцируемый в управляющей обмотке ток, возникающий при смещении плазменного шнура. Величина равновесного смещения шнура с магнитной оси обмотки, при прочих равных условиях, обратно пропорциональна коэффициенту усиления  $K$  индуцируемого тока. Теоретически коэффициент усиления может достигать значений  $> 10$ , тогда как в сверхпроводящем без разрезов кожухе  $K = 1$ . В описываемых экспериментах коэффициент усиления фиксирован и равен 1,8.

При использовании импедансных систем автоматического удержания плазменного шнура с током представляет интерес вопрос о необходимой величине эквивалентной постоянной времени управляющей обмотки. В связи с этим на установке ТО-1 были проведены эксперименты по изучению зависимости макроскопических характеристик плазменного шнура от  $\tau_3$  в диапазоне 0,04 — 2 сек.

На рис. 1 приведены типичные наборы осциллограмм разряда при начальном давлении водорода  $2 \cdot 10^{-4}$  тор, продольном магнитном поле 8,2 кГс и вертикальном корректирующем поле 23 Гс для двух значений эквивалентной постоянной времени управляющей обмотки.

Длительность импульсов тока плазмы, достигающая в экспериментах 400 мсек, существенно зависит от вертикального корректирующего поля (включаемого перед началом разряда). Эта зависимость объясняется, по-видимому, процессами, происходящими на стадии формирования шнура и не связана с быстрым действием регуляторов.

Осциллограммы сигналов с магнитных зондов, измеряющих перемещение плазменного шнура по большому радиусу ( $\Delta_r$ ), можно разделить на три основные стадии движения.

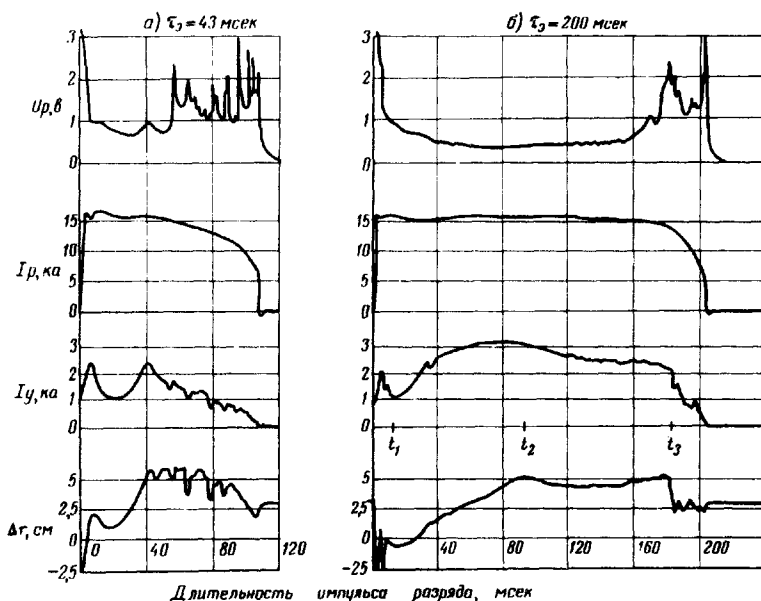


Рис. 1. Напряжение на разряде  $V_p$ , плазменный ток  $I_p$ , амперитки управляющей обмотки  $I_y$  и смещение плазменного шнура по большому радиусу  $\Delta_r$  для двух значений эквивалентной постоянной времени управляющей обмотки  $\tau_0$  в функции времени.

Первая стадия  $0 - t_1$ , длительность которой составляет 10 – 15 мсек и слабо зависит от  $\tau_0$ , характеризуется резкими изменениями всех регистрируемых величин, что указывает на нестационарный характер разряда. При этом происходит сильное взаимодействие шнура с диафрагмой, наблюдаемое по интенсивности свечения линий примесей, проводимость низкая. На второй стадии  $t_1 - t_2$  шнур слабо взаимодействует с диафрагмой (исчезают линии примесей) и смещается к внешней стороне камеры. Проводимость плазмы возрастает и достигает  $5 \cdot 10^{16}$  CGSE. На третьей стадии  $t_2 - t_3$  смещение шнура наружу практически отсутствует, а среднее напряжение на разряде возрастает. Появляются интенсивные линии примесей.

Рассмотрим подробнее вторую стадию, характеризующуюся слабым взаимодействием шнура с диафрагмой. Для этой стадии время движения шнура  $\Delta t = t_2 - t_1$  и средняя скорость смещения шнура  $v_r$  в функции  $\tau_0$ , определенные из осциллограмм, показаны на рис. 2. Видно, что обе

эти кривые при  $t \geq 200$  мсек выходят на свои стационарные значения, тогда как длительность импульсов  $T_{\text{и}}$  тока плазмы монотонно возрастает.

Рост  $T_{\text{и}}$  с увеличением  $\tau_3$  мы объясняем улучшением термоизоляции шнура, так как усредненная за импульс проводимость шнура возрастает, а полный магнитный поток магнитопровода задан. Это предположение подтверждается измерениями диамагнитного эффекта.

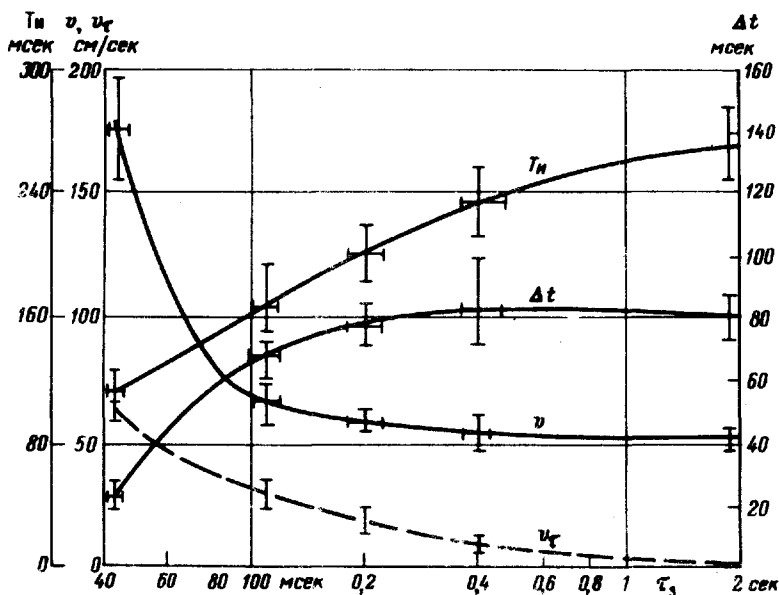


Рис. 2. Зависимость длительности импульса плазменного тока  $T_{\text{и}}$ , времени  $\Delta t = t_2 - t_1$ , скорости  $v$  "свободного" движения шнура и расчетной скорости перемещения шнура  $v_r$  от  $\tau_3$ .

Скорость  $v_r(\tau_3)$  смещения шнура при фиксированных всех действующих на него силах показана на рис. 2 пунктирной кривой. Эта зависимость определена из выражения

$$\delta(l_p \Delta t) = A \left( \delta l_y + \frac{\Delta t}{\tau_3} \bar{l}_y \right), \quad (1)$$

где  $\delta$  — вариация за время  $\Delta t$ ,  $A$  — размерный коэффициент, определяемый из модельного эксперимента,  $\bar{l}_y$  — средний за  $\Delta t$  ток управляющей обмотки.

Из (1) следует, что если все силы, действующие на шнур, неизменны за время  $\Delta t$  и ток разряда  $l_p$  постоянен, то для достаточно большой  $\tau_3$  скорость смещения шнура наружу в состоянии динамического равновесия пренебрежимо мала.

Сравнение графиков  $v_r(\tau_3)$  и  $v(\tau_3)$  позволяет заключить, что практически при  $\tau_3 > 0,4$  сек рассматриваемым смещением можно пренебречь. Скорость смещения шнура наружу  $v(\tau_3)$ , как видно из графика

рис. 2. при  $\tau_3 > 0,2$  сек мало изменяется и составляет  $\sim 50$  см/сек. Это находится в противоречии с экспериментально наблюдаемым ростом давления плазмы во всем диапазоне изменения  $\tau_3$ . Такое расхождение можно объяснить, предположив, что увеличение давления компенсируется эффектом уменьшения индуктивности шнура.

Авторы выражают благодарность И.Н.Головину за полезные обсуждения и замечания по данной работе. Авторы благодарны Н.Н.Швиндту за проделанные оптические измерения.

Поступила в редакцию  
30 января 1973 г.

### Литература

- [ 1 ] О.І. Кухтенко, Ю.І. Самойленко. Автоматичне керування плазовими об'єктами Вісник Академії Наук Української РСР, 3, 1971.
- [ 2 ] Л.И.Артеменков, И.Н.Головин, П.И.Козлов, П.И.Мелихов, Н.Н.Швиндт, Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова, Москва, В.К.Бутенко, В.Ф.Губарев, А.И.Кухтенко, Ю.П.Ладиков-Роев, Ю.И.Самойленко. Институт кибернетики АН УССР, Киев. Эксперименты по равновесию в токамаке ТО-1 без кожуха с применением обратных связей. Plasma physics and Controlled Nuclear Fusion Research , International Atomic Energy Agency, VIENNA, 1971.