

04

Об учете влияния нестационарности при определении времени удержания энергии в токамаке

© М.В. Андрейко, Л.Г. Аскинази, В.Е. Голант, В.А. Корнев,
С.В. Лебедев, Л.С. Левин, А.С. Тукачинский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 10 июня 1997 г.

Неучет быстрых процессов (например, $L-H$ переход) в плазме токамака может привести к большим ошибкам в определении τ_E . Значительная модернизация системы электромагнитной диагностики параметров плазмы и системы сбора позволила учесть влияние нестационарности радиального профиля плазменного тока I_p , его величины и запасенной энергии W на определение τ_E из диамагнитных измерений и исследовать быстрые процессы, происходящие при $L-H$ переходе. Время удержания энергии τ_E вычисляется по формуле

$$\tau_E = W / [U_p \cdot I_p - d/dt (L \cdot I_p^2/2) - d/dt(W)],$$

где U_p — напряжение на обходе плазмы, V ; I_p — ток плазмы, A ; L — полная внутренняя индуктивность, H .

Значение полной индуктивности L плазменного шнура получено из измерений величины $\beta_J + I_i/2$, где β_J — отношение между газокINETическим давлением и давлением полоидального магнитного поля, I_i — внутренняя индуктивность.

Учет нестационарности при определении времени удержания энергии τ_E из диамагнитных измерений дает поправку до 50%.

Неучет быстрых процессов (например, изменения энергосодержания, тока или индуктивности плазменного витка) может привести к большим ошибкам в определении времени удержания энергии τ_E в токамаке. Правильный учет всех производных оказывается не простой задачей из-за сложности аккуратного вычисления всех необходимых величин.

Цель настоящей работы, выполненной на токамаке ТУМАН-3М, состояла в определении τ_E с учетом нестационарности кинетической и магнитной энергий в режиме с переходом в омическую H -моду и в сопоставлении с расчетом τ_E в предположении их неизменности.

С учетом изменения магнитной энергии витка с током и тепловой энергии плазмы время удержания энергии определяется следующим образом [1]:

$$\tau_{E3} = \frac{W}{P_{input} - d/dt (LI_p^2/2) - dW/dt}, \quad (1)$$

где W — запасенная в плазме тепловая энергия, P_{input} — вкладываемая в плазму мощность от всех внешних источников (в случае отсутствия дополнительных методов нагрева $P_{input} = I_p U_p$), L — индуктивность плазменного витка, I_p — ток по плазме, U_p — напряжение на измерительном витке. В случае, когда изменением магнитной энергии можно пренебречь ($d/dt (LI_p^2/2) = 0$), время удержания энергии определяется следующей формулой:

$$\tau_{E2} = \frac{W}{U_p \cdot I_p - dW/dt}. \quad (2)$$

Наконец, в квазистационарном случае ($d/dt (LI_p^2/2) = 2, dW/dt = 0$) формула (1) сводится к

$$\tau_{E1} = \frac{W}{P_{input}}. \quad (3)$$

Модернизация электромагнитной диагностики и системы сбора и обработки экспериментальных данных [2] позволила оценить влияние нестационарности радиального профиля плотности плазменного тока, величины тока и запасенной энергии на определение τ_E из диамагнитных измерений, а также исследовать быстрые процессы, происходящие при $L-H$ переходе.

Для определения W и dW/dt в формулах (1)–(3) использовались измерения диамагнитного эффекта. Значение полной индуктивности L плазменного шнура вычислялось по формуле:

$$L = \mu_0 R \left(\ln \left(8 \frac{R}{b} \right) - \frac{3}{2} + \ln \left(\frac{b}{a} \right) + \frac{l_i}{2} \right), \quad (4)$$

где $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6}$ Н/м, R — большой радиус плазменного шнура, a — малый радиус плазменного шнура, b — расстояние от датчика до центра плазменного шнура, l_i — внутренняя индуктивность. Внутренняя индуктивность определялась из измерений параметра равновесия $\beta_l + l_i/2$ [3] с использованием соотношения $\beta_l = 4/3 \mu_0 \langle W \rangle / B_p^2(a)$.

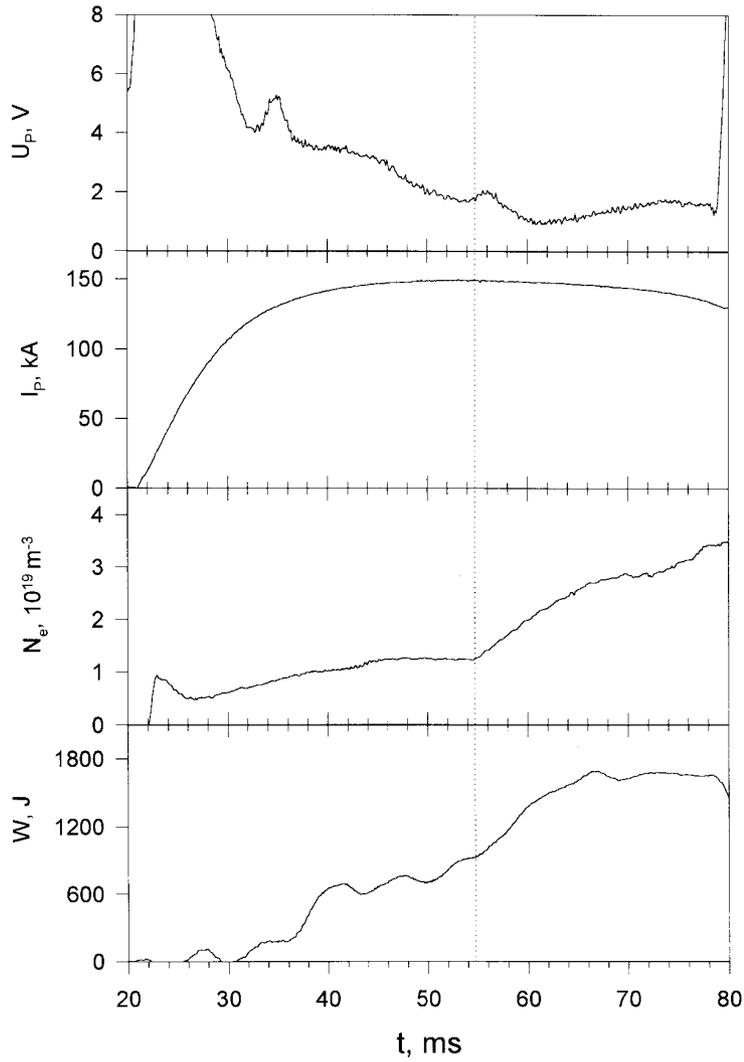


Рис. 1. Временные зависимости параметров плазмы в токамаке ТУМАН-3М: напряжение на обходе U_p , ток в плазме I_p , среднехордовая электронная плотность N_e , запасенная энергия W . Переход в омическую H -моду в момент времени $t = 55$ ms.

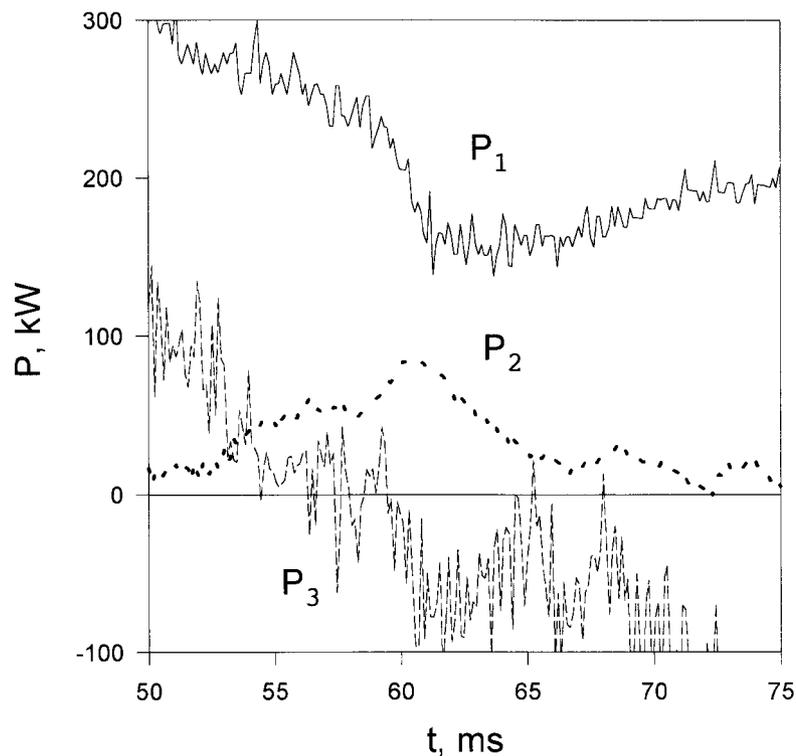


Рис. 2. Временные зависимости различных составляющих мощности нагрева и производной от запасенной энергии в разряде с переходом в омическую H -моду:

$$P_1 = U_p I_p; P_2 = \frac{dW}{dt}; P_3 = \frac{d}{dt} \left(L \frac{I_p^2}{2} \right).$$

Сигналы с поясов Роговского, диамагнитных петель, потоковых петель и градиентных датчиков, необходимые для определения вышеупомянутых величин, записывались и обрабатывались с помощью системы сбора данных.

Измерения проводились в разрядах с переходом в омическую H -моду [4], характеризовавшихся быстрыми изменениями W и I_p . На рис. 1 приведены временные зависимости основных параметров плазмы

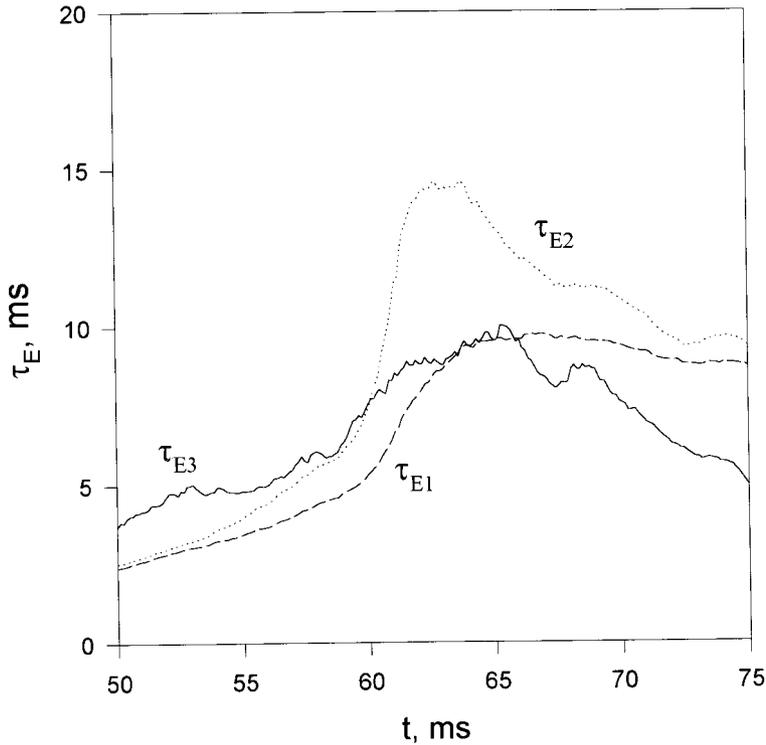


Рис. 3. Расчетные времена удержания энергии в разряде с переходом в омическую H -моду: $\tau_{E1} = \frac{W}{P_{input}}$, $\tau_{E2} = \frac{W}{U_p \cdot I_p - dW/dt}$, $\tau_{E3} = \frac{W}{P_{input} - d/dt(LI_p^2/2) - dW/dt}$.

при переходе в омическую H -моду на токамаке ТУМАН-3М. На рис. 2 приведены временные зависимости различных членов в знаменателе формулы (1) (мощности нагрева, производных от магнитной и запасенной энергий). Видно, что после перехода в омическую H -моду ($t \approx 62$ ms) ни одним членом пренебречь нельзя. На рис. 3 представлены расчетные кривые времен удержания энергии. Первая кривая τ_{E1} вычислена без учета нестационарности (по формуле (3)). Вторая кривая τ_{E2} вычислена с учетом изменения запасенной энергии W (по формуле (2)). Кривая τ_{E3} получена при учете и dW/dt , и изменения

магнитной энергии $d/dt (LI_p^2/2)$. До перехода в омическую H -моду ($t \leq 55$ ms) основной вклад в различие расчетных времен удержания энергии вносит изменение магнитной энергии, обусловленное ростом плазменного тока. После перехода в омическую H -моду ($t \approx 62$ ms) происходит резкий рост энергосодержания при неизменном токе плазмы и соответственно τ_{E2} значительно отличается от τ_{E1} . Однако учет изменения магнитной энергии, обусловленного изменением внутренней индуктивности, компенсирует влияние dW/dt и $\tau_{E1} \approx \tau_{E3}$. После 62 ms различие τ_{E1} , τ_{E2} и τ_{E3} обусловлено изменением $d/dt (LI_p^2/2)$ за счет спада плазменного тока, τ_{E3} становится меньше, чем τ_{E1} , τ_{E2} .

Таким образом, выполненные измерения и расчеты показали, что учет нестационарности при определении времени удержания энергии τ_E из диамагнитных измерений в различных стадиях разряда может давать поправку до 50%.

Обнаружено, что изменение магнитной энергии в результате перестройки профиля тока может существенно влиять на величину времени удержания энергии. В частности, после перехода в омическую H -моду уменьшение магнитной энергии за счет уменьшения внутренней индуктивности (уплощение радиального распределения плотности тока) существенно увеличивает вкладываемую мощность. Учет этого эффекта необходим при определении времени удержания энергии в процессах, сопровождающихся перестройкой профиля тока.

Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 97-02-18107), Миннауки России (токамак ТУМАН-3М, регистрационный № 01-06) и фонда CRDF (проект № RP1-197).

Список литературы

- [1] Мирнов С.В. Физические процессы в плазме токамака. М., 1985.
- [2] Андрейко М.В., Аскинази Л.Г., Голант В.Е. и др. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 4. С. 65.
- [3] Мухоматов В.С., Шафранов В.Д. // Nucl. Fus. 1971. V. 11. N 6. P. 605.
- [4] Arbuzov A.I. et al. // 17th EPS Conf., Amsterdam, 1990. V. 1. P. 299.