

ПРЕДЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ БЕЗИНДУКЦИОННОГО ПОДЪЕМА ТОКА В ТОКАМАКЕ

И.А.Войцехович, В.В.Параил, Г.В.Переверзев

Показано, что скорость подъема тока нижегибридными волнами в установках токамак ограничена нагревом плазмы. Найдена соответствующая максимальной скорости зависимость вводимой мощности от времени, отклонение от которой снижает эффективность преобразования энергии ВЧ волн в энергию магнитного поля.

В современных экспериментах по безындукционному подъему тока в токамаках, а также по перемагничиванию индуктора с помощью нижегибридных (НГ) волн получено преобразование ВЧ энергии в индуктивную энергию магнитного поля с эффективностью до 25%^{1,2}. Результаты этих экспериментов хорошо описываются кинетической теорией с фиксированными параметрами плазмы³. Однако, попытки увеличить эффективность преобразования энергии путем изменения параметров плазмы в соответствии с существующими теоретическими представлениями не привели к успеху. В настоящей работе показано, что помимо кинетических эффектов³ необходимо также учитывать нагрев плазмы, связанный с введением дополнительной мощности. Нагрев увеличивает проводимость плазмы и вместе с ней характерное время изменения плазменного тока. В некоторых условиях возрастание "стороннего" источника тока, а оно сопровождается увеличением вводимой мощности, ведет к снижению скорости подъема тока и тем самым к уменьшению эффективности перекачки ВЧ энергии в индуктивную энергию тока плазмы. Оказывается, что нагрев плазмы приводит к существованию предельной для каждой конкретной установки зависимости тока от времени $I(t)$, превысить которую можно только путем повышения эффективности генерации тока или снижения энергетического времени жизни плазмы.

Для описания подъема тока с учетом нагрева плазмы НГ волнами будем использовать следующую систему уравнений:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{I_{ВЧ}}{\eta} + \frac{U^2}{R} - \frac{W}{\tau_E}, \quad (1)$$

$$Q_{ВЧ} = \frac{I_{ВЧ}}{\eta} - I_{ВЧ} U, \quad (2)$$

$$u = (I - I_{ВЧ})R, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{LI^2}{2} + IU = 0. \quad (4)$$

Здесь W , I , U , R , L , τ_E — соответственно содержание, ток, напряжение на обходе, сопротивление, внешняя индуктивность и энергетическое время жизни плазменного шнура, $Q_{ВЧ}$ — поглощенная ВЧ мощность, $I_{ВЧ}$ — ток быстрых слабостолкновительных электронов, η — эффективность генерации ВЧ тока в отсутствие электрического поля, т.е. при $U=0$. Первые два уравнения описывают баланс энергии в тепловой компоненте и в пучке быстрых электронов на квазистационарной стадии разряда. Третьим уравнением служит закон Ома. Последнее уравнение системы (уравнение внешней цепи токамака) описывает поток энергии из плазменного шнура в полоидальное магнитное поле.

Из уравнений (1) — (3) следует, что для поддержания текущего значения плазменного тока ($U=0$) вводимая в данный момент мощность должна быть равна $Q_{ВЧ} = I/\eta$. Увеличивая мощность, можно обеспечить подъем тока плазмы $dI/dt > 0$ (при этом $U < 0$). Вместе с тем увеличение $Q_{ВЧ}$ приводит и к росту температуры, а, значит, снижению сопротивления плазмы R , что соответствует тенденции к уменьшению dI/dt . Очевидно, что возможна ситуация, когда

эффект нагрева окажется сильнее, и, начиная с некоторого значения $Q_{ВЧ} = Q_{ВЧ}^{опт}$, дальнейшее увеличение вкладываемой мощности вызовет снижение скорости накопления индуктивной энергии.

На рис. 1 показана зависимость эффективности преобразования высокочастотной энергии в энергию полоидального магнитного поля от величины поглощенной мощности. Видно, что кривая $\eta_{эл}(Q_{ВЧ})$ имеет максимум при $Q_{ВЧ} = Q_{ВЧ}^{опт}$. Условие этого максимума можно записать как $\partial\eta_{эл}/\partial Q_{ВЧ} = 0$ или

$$\partial U/\partial Q_{ВЧ} = U/Q_{ВЧ}. \quad (5)$$

Производная здесь вычисляется при постоянном токе, а система уравнений (1) – (3), (5) позволяет найти $Q_{ВЧ}^{опт}$ как функцию тока I , плотности плазмы n , энергетического времени τ_E и эффективности генерации тока η . На рис. 2 представлены результаты решения системы уравнений (1) – (3), (5). Хорошее совпадение расчета с экспериментом показывает, что предложенная выше простая модель правильно передает основные экспериментальные закономерности и позволяет обсуждать дальнейшие следствия этой модели.

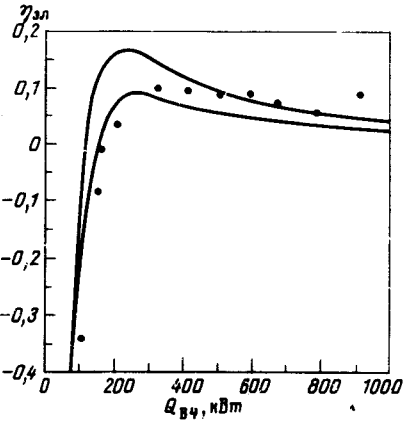


Рис. 1

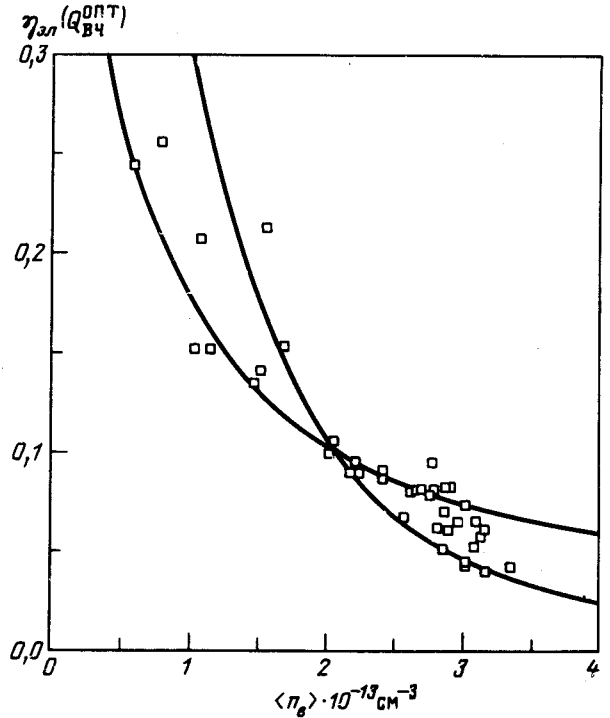


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость эффективности преобразования энергии $\eta_{эл} = (dLI^2/2/dt)/Q_{ВЧ}$ от вводимой мощности. В расчетах проводимость плазмы предполагалась спитцеровской, $I = 90$ кА, $\eta = 0,6$ А/Вт, энергетическое время $\tau_E = 3$ мс выбрано на основании экспериментальных данных работы ⁴. Кривая 1 – $\langle n_e \rangle = 2,5 \cdot 10^{13}$ см⁻³, 2 – $\langle n_e \rangle = 2 \cdot 10^{13}$ см⁻³, точки – эксперимент на токамаке ALCATOR C ²

Рис. 2. Оптимальная эффективность $\eta_{эл}(Q_{ВЧ}^{опт})$ как функция плотности плазмы. Остальные такие же, как на рис. 1. Экспериментальные данные ² показаны точками. Кривая 1 – $\tau_E = 3$ мс, 2 – $\tau_E = 1,5 \cdot 10^{-13}$ $\langle n_e \rangle$ (см)

Прежде всего отметим, что обсуждавшееся выше условие максимума эффективности преобразования энергии не совпадает с условием максимума скорости подъема тока. Как видно из уравнения (4), условием максимума величины dI/dt при данном значении тока I служит

$$\partial U/\partial Q_{ВЧ} = 0. \quad (6)$$

Используя систему уравнений (1) – (3), несложно условие (6) преобразовать к виду

$$\frac{\partial}{\partial T} \left[R \left(\frac{W}{\tau_E} - \frac{I}{\eta} \right) \right] = 0. \quad (7)$$

Предполагая для простоты проводимость плазмы спитцеровской из (7) находим, что скорость подъема тока dI/dt как функция вводимой мощности $Q_{ВЧ}$ имеет максимум, если энергетическое время жизни плазмы τ_E падает с ростом температуры не быстрее, чем $T^{-1/2}$. В частности, при алкаторном коэффициенте теплопроводности $\tau_E \sim n$ условие (6) совпадает с $Q_{ВЧ} = 3I / \eta - IU$. Второе слагаемое в правой части обычно составляет не более 10% от первого, поэтому приближенно можно считать

$$Q_{ВЧ} = 3I / \eta. \quad (8)$$

Таким образом, максимальная скорость роста тока или, что то же самое, максимальная скорость преобразования энергии внешнего ВЧ источника в энергию полоидального магнитного поля достигается, когда вводимая мощность в три раза превышает мощность, необходимую для поддержания данного тока на постоянном уровне. Максимальная эффективность преобразования энергии, как видно из сравнения условий (5) и (6), всегда реализуется при меньшем уровне вводимой мощности, т.е. при $Q_{ВЧ}^{OPT} \lesssim 3I / \eta$. Отметим, что последний вывод хорошо согласуется с установленным экспериментально в широком диапазоне параметров условием $2 \leq \eta Q_{ВЧ}^{OPT} / I \leq 3^2$.

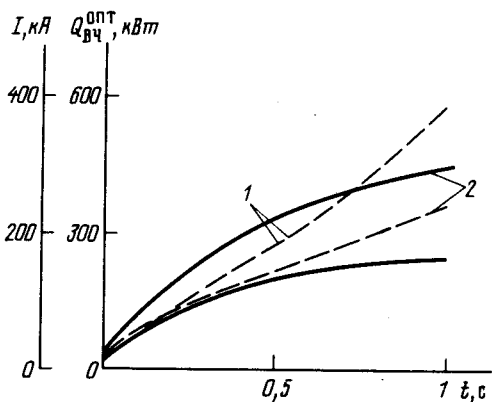


Рис. 3. Максимально возможный ток $I_{пр}(t)$ (сплошные линии) и соответствующая ему ВЧ мощность $Q_{ВЧ}^{OPT}(t)$ (пунктир) для установки Т-7 при $\tau_E = 10^{-12} \langle n_e \rangle$ (мс), $\eta = 2 \cdot 10^{13} / \langle n_e \rangle$ (А/Вт). Кривая 1 - $\langle n_e \rangle = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, 2 - $\langle n_e \rangle = 0,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

Мы установили, что существует предельная скорость подъема тока в установках токамак с помощью НГ волн. Эта предельная скорость определяется энергетическим временем жизни плазмы, эффективностью генерации тока, а также значением тока в текущий момент времени. Если фиксировать плотность плазмы, то останется зависимость только от величины тока. Последнее означает, что существует некоторая предельная зависимость тока от времени $I_{пр}(t)$. Такие зависимости показаны на рис. 3 при разных значениях плотности для установки Т-7. Область на плоскости (t, I) под кривой $I_{пр}(t)$ является областью доступной для токамака. Рабочая точка может оказаться незначительно выше этой кривой только за счет отброшенных в нашем рассмотрении коротких времен перестройки энергосодержания плазменного шнура.

Литература

1. Jones F. et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 55, 1295.
2. Takase Y., Knowlton S., Porkolab M. PFC/JA-86-52, Cambridge, 1986.

3. *Fisch N.J., Karney C.F.F.* Phys. Rev. Lett., 1985, **54**, 897.

4. *Porkolab M., Bonoli P., Chen K.I. et al.* IAEA-GN-47/F-11-2.

Институт атомной энергии им.И.В.Курчатова

Поступила в редакцию

15 мая 1987 г.