

01;04;12

©1994

РЕГУЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ОСТРОВОВ С МАЛЫМИ “ВОЛНОВЫМИ” ЧИСЛАМИ В СТЕЛЛАРАТОРНЫХ ЛОВУШКАХ

А.В.Золотухин, А.А.Шишкин

1. Резонансные структуры (магнитные острова) возникают в магнитных ловушках на магнитных поверхностях с рациональными значениями угла вращательного преобразования $\iota = n/m$ (n и m — целые числа), если возмущающее магнитное поле содержит гармоники вида $\cos(n\vartheta - m\varphi)$, где ϑ и φ — угловые переменные вдоль малого и большого обходов тора [1]. Появление магнитных островов (с малыми значениями n и m) может смениться на периферии плазмы “блуждающим” ходом силовых линий, т. е. привести к разрушению магнитных поверхностей и ухудшению удержания плазмы. Подавление магнитных островов для увеличения объема удержания, или наоборот, создание островных структур для дивертирования плазмы, т. е. управление островами, является насущной задачей для всех стеллараторных установок.

Управление островами можно осуществлять различными методами, например внесением изменений в навивку винтовых проводников, подбором токов в обмотках вертикального поля. В настоящей работе мы обращаем внимание на практически осуществимый путь подавления островов в уже готовой установке изменением токов в обмотках вертикального поля; такие обмотки реально присутствуют во всех установках торсатронного типа: “Ураган-2М”, “Ураган-3М”, “Heliotron-E”, ATF, в сооружаемой установке LHD, а также в модульном стеллараторе Wendelstein 7 As [2]. Для всех этих ловушек существует проблема управления островами. Второй отличительный момент настоящей работы — применение аналитического подхода к описанию резонансных структур и поиску способов их регулирования. Суть развитого нами метода заключается в определении вкладов, которые вносят разные токовые обмотки, в возмущение магнитного поля с выделенной резонансной гармоникой, или, другими словами, в получении выражений, связывающих амплитуды возмущений для выделенных резонансов с параметрами токовых обмоток, и нахождении таких значений токов, при которых амплитуда возмущения, вызывающего конкретный резонанс (или ам-

плитуды возмущений нескольких резонансов), обращается в нуль. Этот подход наиболее удобен при изучении резонансов со сравнительно небольшими значениями n и m , а также углом вращательного преобразования, слабо отличающимся от 1. Именно такие конфигурации реализуются в упомянутых выше стеллараторных установках. Здесь мы покажем работоспособность этого подхода на примере торсатрона "Ураган-2М", где наиболее опасными в конфигурации с $\iota > 1/2$ оказываются резонансы в магнитных поверхностях при $\iota = 4/7, 4/6, 4/5$ [3]. Подавлению островов конфигурации "Ураган-2М" посвящен ряд работ [4-6], однако в этих работах используются численные подходы, требующие достаточно большого времени счета на мощных ЭВМ и не всегда физически наглядные. Поэтому поиск аналитического описания резонансов и способов их регулирования, которому посвящена настоящая работа, сохраняет актуальность.

2. Как известно [1], для описания магнитных поверхностей с учетом островной структуры решается уравнение для Ψ в линеаризованном виде

$$\mathbf{B}^{(0)} \cdot \nabla \Psi^{(1)} = -\mathbf{B}^{(1)} \cdot \nabla \Psi^{(0)}, \quad (1)$$

где \mathbf{B}^1 — возмущающее магнитное поле, наложенное на основное поле $\mathbf{B}^{(0)}$ и приводящее к расщеплению магнитной поверхности, описываемой потоковой функцией $\Psi^{(0)}$, на изолированную цепочку островов. Зная, что резонансы при $\iota = 4/7, 4/6, 4/5$ имеют наиболее заметные размеры островов и используя выражения для компонентов магнитного поля от кольцевых проводников, получаемые с помощью закона Био-Савара [7], можно придать правой части уравнения (1) следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}^{(1)} \cdot \nabla \Psi^{(0)} = & \sum_i \frac{0.4I_i}{a_h^2} \cdot (-2) \cdot \varepsilon \frac{R_i}{R} \times \\ & \times \left\{ \left(\frac{r}{R} \right)^5 C_{5,i} \sin(5\vartheta - 4\varphi) + \left(\frac{r}{R} \right)^6 C_{6,i} \sin(6\vartheta - 4\varphi) + \right. \\ & \left. + \left(\frac{r}{R} \right) C_{7,i} \sin(7\vartheta - 4\varphi) \right\}. \quad (2) \end{aligned}$$

Здесь I_i — ток в проводнике i -й пары обмоток вертикального поля, a_h и R — малый и большой радиусы тора, на поверхности которого уложены винтовые проводники, R_i —

радиус кольцевого проводника из i -й пары, ε — отношение винтового поля к продольному полю на круговой оси тора, r — радиальная координата. Коэффициенты $C_{k,i}$ зависят от координат R_i и Z_i , где Z_i — координата “высоты” кольцевого проводника i -й пары, отсчитываемой параллельно прямой оси тора от экваториальной плоскости тора [7]. Так, например, выражение для C_5 , имеет вид

$$\begin{aligned}
 C_5 = & \frac{105}{24} \cdot \int_0^\pi d\Psi \cdot \frac{\cos 2\Psi}{D^{9/2}} \left[F_1^3 + 3F_t \tilde{Z}_i^2 \right] + \\
 & + \frac{945}{48} \cdot \int_0^\pi d\Psi \cdot \frac{\tilde{Z}_i \cos 2\Psi}{D^{11/2}} \cdot \left[F_i^3 \tilde{Z}_i - F_i \tilde{Z}_i^3 \right] + \\
 & + \frac{945}{192} \cdot \int_0^\pi d\Psi \cdot \frac{(\tilde{R}_i - \cos 2\Psi)}{D^{11/2}} \cdot \left[F_i^4 - 6F_i^2 \tilde{Z}_i^2 + \tilde{Z}_i^4 \right] + \dots \quad (3)
 \end{aligned}$$

Здесь $\tilde{Z}_i = Z_i/R$, $\tilde{R}_i = R_i/R$, $F_i = 1 - \tilde{R}_i \cos 2\Psi$, $D = 1 + \tilde{Z}_i^2 + \tilde{R}_i^2 - 2\tilde{R}_i^2 \cos 2\Psi$. Отметим, что вклад от винтовых токов, например, в амплитуду возмущения при $t = 4/5$ составляет 3% от аналогичного вклада от обмоток вертикального поля [7]. При выводе (2) в Ψ^0 учитывается только основная гармоника, а в качестве поля $B^{(1)}$ взяты поля от кольцевых проводников, поскольку мы хотим регулировать амплитуды возмущений, изменяя токи в кольцевых проводниках.

Амплитуды возмущений, вызывающих резонансы на поверхностях с $\iota = 4/7, 4/6, 4/5$, должны быть минимальными, если коэффициенты при гармониках $\sin(7\vartheta - 4\varphi)$, $\sin(6\vartheta - 4\varphi)$ и $\sin(5\vartheta - 4\varphi)$ в правой части уравнения (2) равняются нулю. Эти условия приводят к системе уравнений для нахождения соответствующих токов в обмотках вертикального поля

$$\sum_{k=1}^4 G_{i,k} I_k = 0, \quad (4)$$

где $G_{i,k} = \frac{R_k}{R} \cdot C_{i,k}$, $i = 5, 6, 7$. Здесь учтено, что в торса-троне “Ураган-2М” четыре пары обмоток вертикального поля (рис. 1); поэтому можно наложить дополнительное требование к условиям зануления амплитуд возмущений для трех резонансов, например на величину вертикального поля на круговой оси тора. Решение системы уравнений (4) при учете явного вида $C_{i,k}$ позволяет найти набор оков $I_1/I_2/I_3/I_4$,

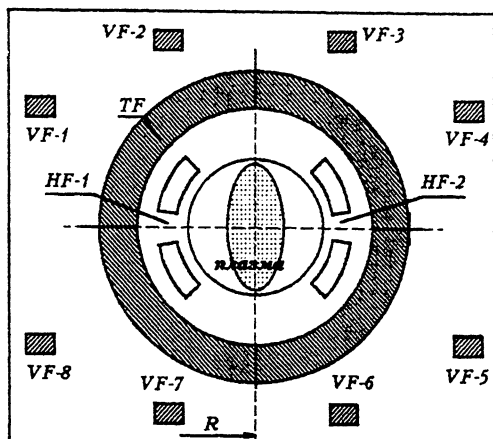


Рис. 1. Система токовых обмоток в торсатроне "Ураган-2М": VF — обмотки вертикального поля, TF — тороидального поля, HF — винтового поля.

при которых резонансные структуры должны быть уменьшены. Это означает, что первоначально используемый набор токов в обмотках вертикального поля 370/400/400/370 [4], приводящий к островным структурам больших размеров, должен быть заменен на другой набор: 290/265/175/514. Здесь значения токов указаны в кА при токе в обмотках тороидального поля 666 кА в каждой из 16 катушек, и токе 1600 кА в каждом из полюсов двухполюсной винтовой обмотки.

3. Выводы, сделанные выше на основе приближенных аналитических вычислений, мы проверили численным интегрированием уравнений силовых линий с использованием достаточно строгого задания магнитного поля от винтовых проводников [8]. Сравнение сечений магнитных поверхностей (в одной меридиональной плоскости) (рис. 2) при двух указанных выше наборах токов в обмотках вертикального поля позволяет сделать такие выводы: положение магнитной оси приблизительно одинаковое в обеих конфигурациях; резонанс при $\iota = 4/7$ не проявляется; на резонансной поверхности с $\iota = 4/6$ при смене набора токов происходит перестройка островной структуры, так что седловые точки переходят в точки типа "центр", и наоборот, что означает "передавливание" данного возмущения; в отличие от первоначального варианта (рис. 2, а) резонансная поверхность $\iota = 4/5$ разрушалась, новый набор токов приводит к существенному уменьшению поперечных размеров островов с появлением внешней охватывающей поверхности (рис. 2, б),

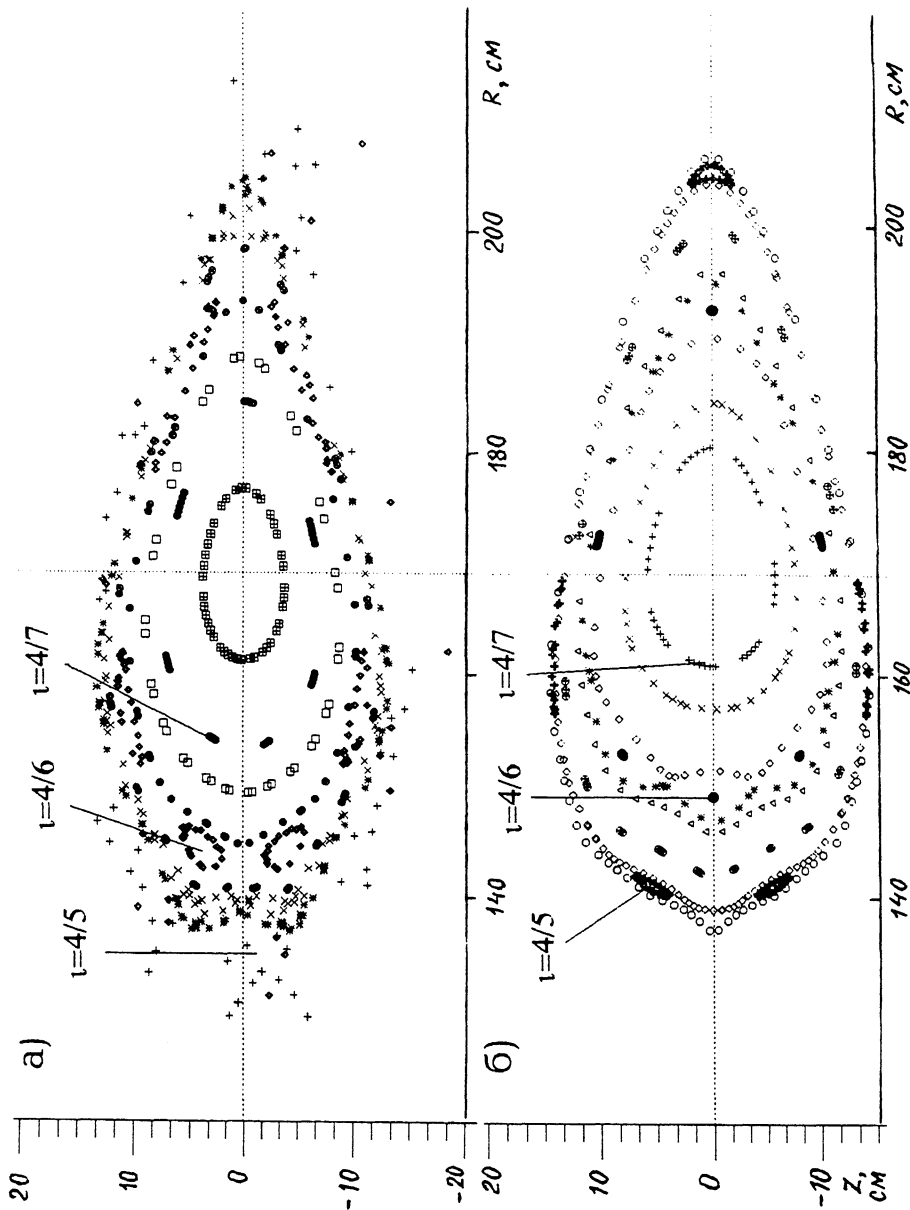


Рис. 2. Сечения магнитных поверхностей в одной меридиональной плоскости при различных наборах токов $I_1/I_2/I_3/I_4$ в обмотках вертикального поля: а — 370/400/400/370, б — 290/265/175/514.

что является наиболее важным выводом из проведенного сравнения.

4. Подход с использованием закона Био-Савара для выражения компонентов магнитного поля от системы винтовых и кольцевых проводников в стеллараторных (торсатронных) ловушках позволяет описать резонансные структуры в магнитных поверхностях и позволяет найти значения токов в обмотках вертикального поля, при которых существенно уменьшаются магнитные острова при наиболее опасном резонансе на периферии плазмы ($\iota = 4/5$ в данном случае) и вместо блуждающего хода силовой линии в окрестности резонанса ($\iota = 4/5$) возникает охватывающая его замкнутая магнитная поверхность.

Список литературы

- [1] Соловьев Л.С., Шафранов В.Д. // Вопросы теории плазмы. 1967. В. 5. С.3-208.
- [2] Lyon J.F. // Fusion Technology 1990. V.17. N 1. P.19-32.
- [3] Беседин Н.Т., Кузнецов Ю.К., Панкратов И.М. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1987. В. 3. С.18-20.
- [4] Bykov V.E., Shishkin A.A., Kisslinger J., Rau F. Preprint of Max-Planck Institut fur Plasmaphysik. IPP 2/301. August 1989.
- [5] Bykov V.E., Kuznetsov Yu. K., Pavlichenko O.S. et al. // Extended synopses o 13th Intern. Conf. of Plasma Physics and Contr. Nucl. Fus. Research, 1990. Report C-4-6-1-(C). P. 128.
- [6] Besedin N.T., Lesnyakov G.G. Pankratov I.M. 18 Europ. Conf. on Contr. Fus. and Plasma Physics. Berlin. 1991. V. 15C. Pt. II. P. 145-148.
- [7] Zolotukhin A.V., Shishkin A.A. // Kharkov Institute of Physics and Technology Preprint KFTI 91-47. Kharkov, 1991.
- [8] Калюжный В.Н., Немов В.В., Быков В.Е. и др. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1986. В.2. С. 33-39.

Харьковский физико-технический
институт

Поступило в Редакцию
3 февраля 1994 г.