

## Специальная корректирующая обмотка торсатрона

© В.Г. Котенко

Институт физики плазмы национального научного центра „Харьковский физико-технический институт“,  
61108 Харьков, Украина  
e-mail: volkov@ipp.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 4 февраля 2004 г.)

Численными расчетами на примере модели 2-заходного торсатрона показана возможность двумерного контроля за положением области замкнутых магнитных поверхностей в винтовых магнитных системах. Смещение области в направлении, перпендикулярном к экваториальной плоскости тора, осуществляется с помощью магнитного поля, создаваемого специальной корректирующей обмоткой.

В первых экспериментальных исследованиях структуры магнитного поля в замкнутой винтовой тороидальной магнитной системе (стелларатор „Ливень-1“) с применением методики высокого разрешения [1] были обнаружены явные признаки стабильного смещения области существования замкнутых магнитных поверхностей (ОП) в направлении, перпендикулярном к экваториальной плоскости тора (поперечное или осевое смещение вдоль оси вращения тора). Возникновение смещения объясняется возмущениями магнитного поля, к которым могут привести неточности изготовления и монтажа отдельных узлов реальной магнитной системы. В этой же работе были проведены экспериментальные измерения величины смещения ОП вдоль экваториальной плоскости тора (смещение по большому радиусу тора, радиальное смещение), возникающего в результате воздействия сравнительно небольшого по величине однородного поперечного магнитного поля. Тем самым была продемонстрирована возможность управления радиальным положением плазменного шнура в плазменных ловушках стеллараторного типа с помощью кольцеобразных корректирующих обмоток. Однако вопрос о возможности коррекции осевой компоненты смещения ОП не был поставлен и остается открытым до сих пор. Поэтому существующие и проектируемые в настоящее время винтовые или винтоподобные тороидальные магнитные системы лишены средств двумерного контроля за положением ОП.

В настоящей работе численными расчетами показана возможность управления величиной осевого смещения ОП в торсатроне с помощью специальной корректирующей обмотки. Ее геометрия указывает на характер дефекта, ответственного за осевое смещение ОП, который может иметь место при изготовлении реальной винтовой магнитной системы.

Специальная корректирующая обмотка представляет собой вспомогательную винтовую обмотку, уложенную особым образом на поверхность того же тора, что и основная винтовая обмотка торсатрона. Каждому из  $l$  заходов основной винтовой обмотки приведен в соответствие один заход вспомогательной винтовой обмотки. Любая точка вспомогательной базовой винтовой линии, вдоль которой уложен заход вспомогательной винтовой

обмотки, находится на расстоянии  $S = \text{const}$  от основной базовой винтовой линии, вдоль которой уложен соответствующий заход основной винтовой обмотки. Расстояние  $S = \text{const}$  отсчитывается вдоль параллели тора, проведенной через эту точку. В декартовой системе координат, где ось  $z$  направлена вдоль оси вращения тора, уравнение вспомогательной линии может быть записано в параметрическом виде, удобном для численных расчетов,

$$\begin{aligned}x &= (R_0 + a \cos(\theta(\varphi))) \cos\left(\varphi \pm S / (R_0 + a \cos(\theta(\varphi)))\right), \\y &= (R_0 + a \cos(\theta(\varphi))) \sin\left(\varphi \pm S / (R_0 + a \cos(\theta(\varphi)))\right), \\z &= a \sin(\theta(\varphi)).\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь  $R_0$  — большой радиус тора,  $a$  — малый радиус тора,  $\theta$  — полоидальный угол,  $\varphi$  — тороидальный угол,  $\theta(\varphi)$  — закон навивки основной винтовой обмотки, выбор знака в выражении для аргумента зависит от направления отсчета расстояния  $S$ . Численные расчеты проводились для модели торсатрона, схематически представленной на рис. 1. Магнитная система торсатрона состоит

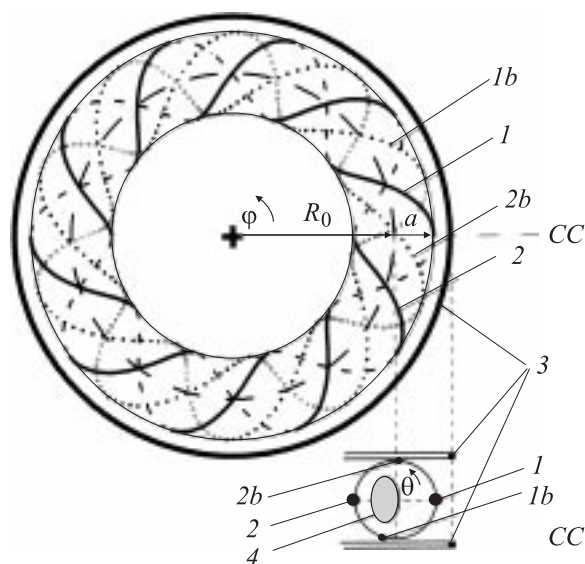
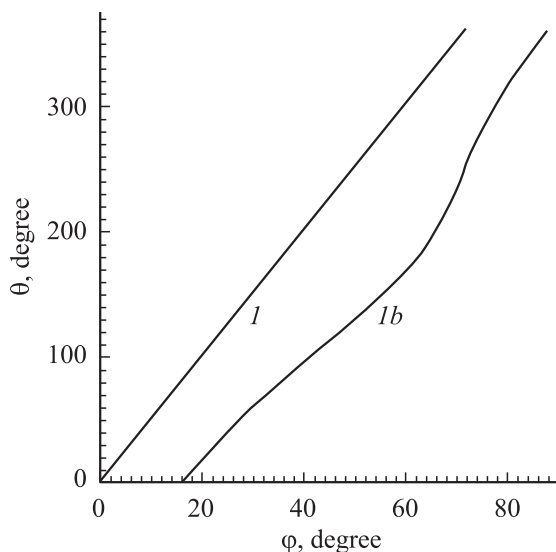


Рис. 1. Схема расчетной модели торсатрона. Вид сверху и в сечении  $CC$ .



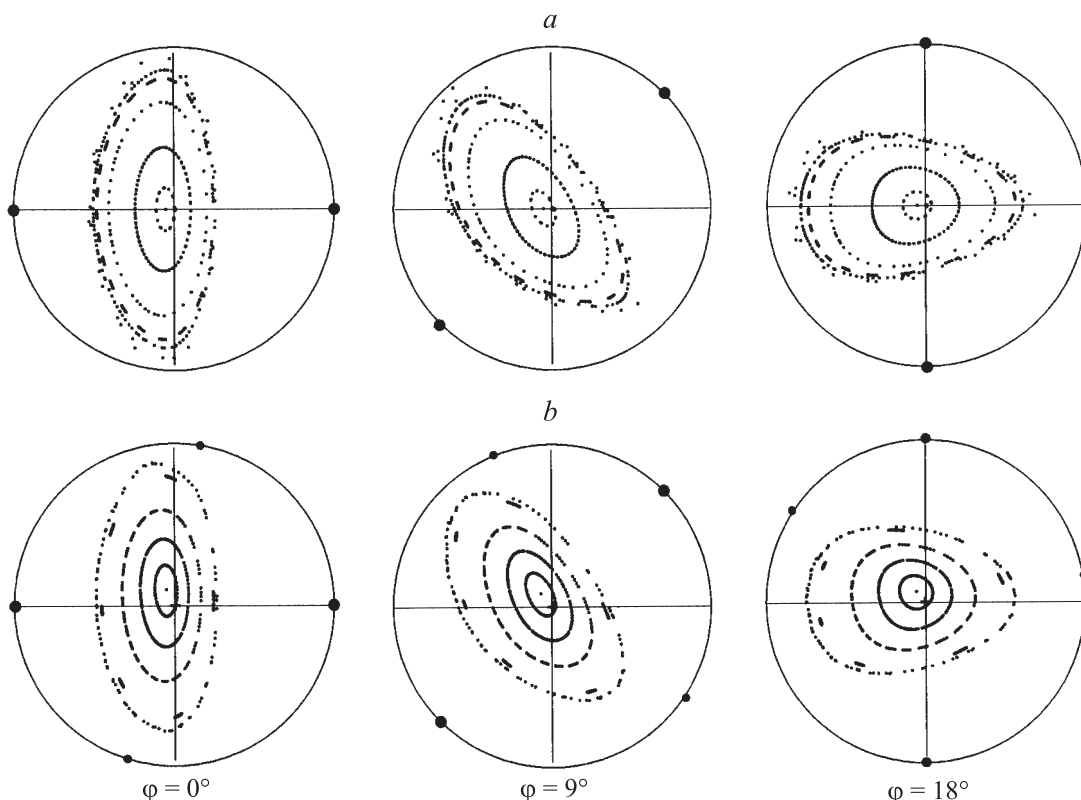
**Рис. 2.** Зависимости величины полоидального угла  $\theta$  от тороидального угла  $\varphi$  для основной (1) и вспомогательной (1b) базовых винтовых линий на длине одного шага.

из двух заходов ( $l = 2$ ) основной винтовой обмотки, уложенных вдоль базовых винтовых линий 1 и 2 на поверхности тора  $a/R_0 = 0.25$ . Необходимым элементом магнитной системы торсатрона является также минимум

одна пара кольцеобразных компенсирующих обмоток 3 со встроенными кольцеобразными корректирующими обмотками (отдельно на рисунке не показаны). Компенсирующие обмотки необходимы для получения ОП 4 в пределах объема, охватываемого винтовыми обмотками. Кольцеобразные корректирующие обмотки служат для коррекции положения ОП вдоль экваториальной плоскости тора.

Базовые винтовые линии 1 и 2 навиты по закону цилиндрической спирали  $\theta(\varphi) = m\varphi$ , где  $m = 5$  — количество шагов каждой из линий на длине тора. Базовой линии 1 основной винтовой обмотки соответствует базовая винтовая линия 1b вспомогательной винтовой обмотки, соответственно линии 2 — линия 2b. Точки линий 1 и 1b (2 и 2b), принадлежащие одной и той же параллели тора, отстоят друг от друга на расстоянии  $S/R_0 = 0.35$ . Это расстояние отсчитывается от линии 1 (2) вдоль параллели в направлении увеличения тороидального угла  $\varphi$ .

Для рассматриваемого случая на рис. 2 в графическом виде представлены законы наливки основной (1) и вспомогательной (1b) базовых винтовых линий. Видно существенное нелинейное, труднодоступное для аналитического описания, отличие „производного“ закона наливки вспомогательной винтовой обмотки от „первообразного“ линейного закона наливки основной винтовой обмотки.



**Рис. 3.** Сечения магнитных поверхностей в пределах полупериода магнитного поля: a — специальная корректирующая обмотка обесточена, b — величина тока в специальной корректирующей обмотке составляет 0.03 величины тока в основной винтовой обмотке.

На рис. 3 показаны полученные из расчета сечения ОП, т.е. области существования замкнутых магнитных поверхностей в рассматриваемой модели торсатрона:  $a$  — сечения ОП для случая с отключенной вспомогательной обмоткой, т.е. характерные для обычного торсатрона в режиме с плоской магнитной осью, здесь ОП расположена симметрично относительно экваториальной плоскости тора;  $b$  — сечение ОП для режима с включенной вспомогательной обмоткой, когда величина тока в ее заходах составляет 0.03 величины тока в заходах основной винтовой обмотки, в этом случае все сечения ОП смещены вверх относительно экваториальной плоскости тора на расстояние  $\sim 0.1a$ . При изменении направления тока ОП смещается вниз. Такого же эффекта без изменения направления тока можно достичь с помощью вспомогательной винтовой обмотки, для которой отсчет расстояния  $S$  произведен в противоположном (против угла  $\varphi$ ) направлении. Расчеты также показывают, что при наложении магнитного поля вспомогательной винтовой обмотки положение ОП вдоль экваториальной плоскости не изменяется.

Таким образом, рассмотренная вспомогательная винтовая обмотка способна выполнить все функции специальной корректирующей обмотки относительно осевого положения ОП. Ее действие в комбинации с обычной кольцеобразной корректирующей обмоткой позволит в случае необходимости реализовать двумерный контроль за положением плазменного шнура в замкнутых магнитных ловушках стеллараторного типа.

В заключение следует отметить следующее. Если, например, однослойная намотка захода основной винтовой обмотки ведется вдоль базовой винтовой линии в одну от нее сторону виток к витку с постоянной толщиной изоляции между ними, то уравнение винтовой линии последнего витка в слое может оказаться подобным уравнению (1) с параметром  $S = (n - 1)d$ , где  $n$  — число витков в слое,  $d$  — диаметр проводника с изоляцией. В результате положение ОП в реальной магнитной системе может не совпасть с расчетным. Частично проблему может решить симметризованная намотка проводника, т.е. намотка виток к витку в обе стороны от базовой винтовой линии или намотка каждого в отдельности витка по закону основной базовой винтовой линии.

## Список литературы

- [1] Бережецкий М.С., Гребеников С.Е., Попрядухин А.П., Штигель И.С. // ЖТФ. 1965. Т. 35. Вып. 12. С. 2167–2175.