

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ им. Д.В.ЕФРЕМОВА

---

НИИЭФА П-Б-0698

НИИЭФА - П-Б - 0698.

А.М.Астапкович, С.Н.Садаков

АНАЛИЗ ПРОНИКНОВЕНИЯ МАГНИТНОГО И  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ ЧЕРЕЗ БЛАНКЕТ  
РЕАКТОРА-ТОКАМАКА НА СТАРТЕ РАЗРЯДА

МОСКВА  
ЦНИИАТОМИНФОРМ  
1985

Астапкович А.М., Садаков С.Н. Анализ проникновения магнитного и электрического полей через бланкет реактора-токамака на старте разряда: Препринт Б-0698. - М.: ЦНИИатоминформ, 1985, 8 с., с ил., цена 6 к.

Рассматривается методика анализа переходных электромагнитных процессов в азимутально-секционированных конструкциях с использованием подхода связанных контуров, приводятся результаты расчета проникновения вертикального магнитного поля и вихревой э.д.с. через бланкет реактора-токамака на начальном этапе старта разряда. Получена зависимость задержки проникновения магнитного поля и вихревой э.д.с. от величины активного сопротивления бланкета по обходу тора.

С Центральным научно-исследовательским институтом информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИатоминформ), 1985 г.

В большинстве современных конструктивных вариантов реактор-токамаков /1,2/ рассматривается азимутально-сегментированная структура blankets, в которой отдельные массивные секторы соединяются между собой относительно высокоомными сиффонами (рис.1). Активное сопротивление такой структуры по большому обходу тора  $R_K$  складывается из сопротивления секторов blankets  $R_a$  и сопротивления сиффонов  $R_c$ :  $R_K = R_a + R_c$ . Обычно  $R_a \ll R_c$  и  $R_K \approx R_c$ . Параметр  $R_K$  (или  $R_c$ ) во многом определяет электромагнитные свойства конструкции blankets. В данной работе приводятся результаты численного исследования влияния параметра  $R_K$  на задержку проникновения вихревой э.д.с.  $E$  и вертикального магнитного поля  $B$  на начальном этапе старта разряда.

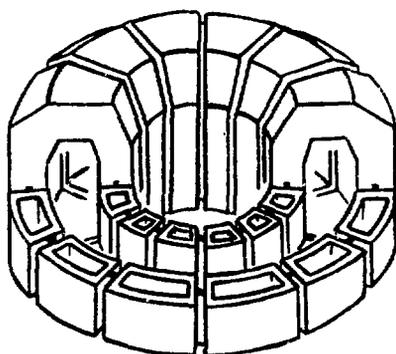


Рис.1. Эскиз азимутально-сегментированной структуры blankets

Принятая при расчетах конфигурация blankets и обмотки полоидального поля (ОПП) показана на рис.2, в целом она соответствует проекту /1/. Секторы blankets имеют коробчатое сечение, ограниченное внутренней (обращенной к плазме), наружной и торцевыми стенками. Поверхностное активное сопротивление внутренней стенки принято равным  $\rho_B/\delta_B = 6,66 \cdot 10^{-5}$  Ом, наружной  $\rho_H/\delta_H = 1,88 \cdot 10^{-5}$  Ом,

что примерно соответствует толщине листа из нержавеющей стали  $\delta_B \approx 1,5$  см и  $\delta_H \approx 5,3$  см. При этом величина  $R_a$  составляет примерно  $R_a \approx 4 \cdot 10^{-5}$  Ом. Параметр  $R_c$  принимает значения  $R_c = 5 \cdot 10^{-5}$ ;  $10^{-4}$ ;  $2 \cdot 10^{-4}$ ;  $4 \cdot 10^{-4}$  и  $10^{-3}$  Ом; соответственно  $R_K = 9 \cdot 10^{-5}$ ;  $1,4 \cdot 10^{-4}$ ;  $2,4 \cdot 10^{-4}$ ;  $4,4 \cdot 10^{-4}$  и  $1,04 \cdot 10^{-3}$  Ом.

Для анализа используются две расчетные модели blankets, основанные на подходе связанных электрических контуров. Первая модель является осесимметричной, т.е. соответствует реальному blanketу лишь по величине  $R_K$  и не передает азимутальной периодичности его структуры. Она не учитывает экранирующего действия замыкающихся в пределах секторов blankets так называемых седловидных токов и поэтому дает оценку снизу для времени проникновения вихревой э.д.с. и магнитного поля /4/.

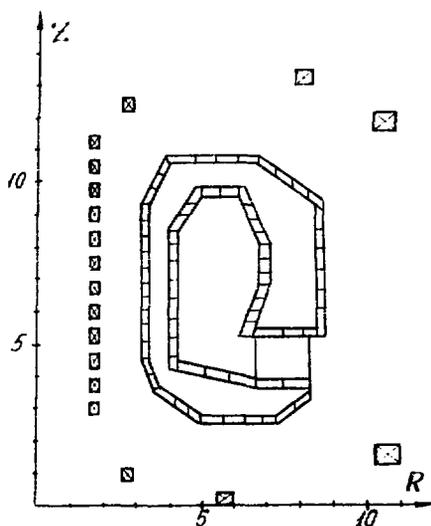


Рис.2. Расчетная конфигурация сектора blankets и обмотки поперечного поля

Вторая модель, наоборот, предполагает существование массивных секторов blankets с хорошо проводящими торцевыми стенками /2,4,6/. Она более подробно описана в приложении и основывается на выполнении неравенств:

$$l_T / l_a \ll 1, L_T / L_a \ll 1, R_T / R_a \ll 1, \quad (I)$$

где  $l_T$  - величина зазора между секторами blankets;  
 $l_a$  - азимутальная протяженность сектора;  
 $L_T$  - характерная индуктивность зазора;  
 $L_a$  - характерная индуктивность продольных (неторцевых) частей сектора;  
 $R_T$  - активное сопротивление торцевых стенок секторов;  
 $R_a$  - активное сопротивление продольных частей секторов blankets.

Естественно, что пренебрежение величинами  $L_T$  и  $R_T$  в сравнении с  $L_a$  и  $R_a$  ведет к определенному завышению расчетных значений вихревых токов, и поэтому рассматриваемая модель дает оценку сверху для времени проникновения вихревой э.д.с. и магнитного поля через blankets.

Совместное применение обеих расчетных моделей позволяет определить "вилку" возможных значений экранирующих характе-

ристик реального бланкета для каждого значения  $R_k$ . При этом результаты, получаемые с использованием осесимметричной модели, соответствуют варианту конструкции бланкета с тонкостенными секторами ( $R_\alpha \geq R_c$ ) и большим количеством сальфонов; а результаты, полученные для модели азимутально-секционированной структуры, - варианту бланкета с массивными секторами ( $R_\alpha < R_c$ ) и относительно редко расположенными сальфонами.

Обе расчетные модели были реализованы с помощью вычислительной программы EDDYC-1. Использование в ней алгоритмы расчета коэффициентов матриц индуктивностей и численного интегрирования описаны в работах /5,6/.

Все расчеты выполнены в предположении отсутствия тока плазмы и для линейных законов изменения токов в катушках ОПШ. Скорости нарастания этих токов соответствуют полученным при расчете режима работы ОПШ без учета электромагнитных явлений в бланкете. Используются относительные величины  $E' = E/E_0$  и  $B' = B/B_0$ . Значения  $E$  и  $B$  получены с учетом, а  $E_0$  и  $B_0$  - без учета электромагнитных явлений в бланкете, причем  $B_0$  соответствует моменту времени  $t = 0,3$  с.

На рис.3 приведены кривые изменения вихревой э.д.с. ( $E' - 1,2$ ) и вертикального магнитного поля ( $B' - 3,4$ ) на оси разрядной камеры при  $R_k = 2,4 \cdot 10^{-4}$  Ом. Кривые 1 и 3 получены для модели азимутально-однородного бланкета (т.е. при  $R_c = 0$ ,  $R_\alpha = 2,4 \cdot 10^{-4}$  Ом); а кривые 2 и 4 - для модели азимутально-секционированного бланкета ( $R_c = 2 \cdot 10^{-4}$  Ом,  $R_\alpha = 0,4 \cdot 10^{-4}$  Ом).

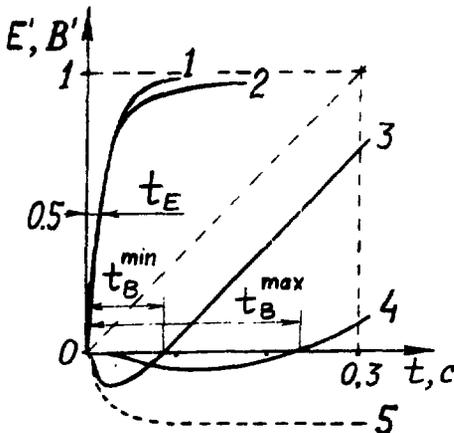


Рис.3. Демпфирование вихревой э.д.с. и вертикального магнитного поля на старте разряда при  $R_k = 2,4 \cdot 10^{-4}$  Ом: 1,3,5 - модель азимутально-однородного бланкета; 2,4 - модель азимутально-секционированного бланкета; 1,2 -  $E'$ ; 3,4 -  $B'$ ; 5 -  $B_{тр}$ .

На начальном этапе проникающее в разрядную камеру магнитное поле имеет обратное направление по отношению к направлению прикладываемого равновесного поля. Этот эффект объясняется существованием магнитного поля  $V_{TP}$ , создаваемого текущим по бланкету транспортным током  $I_{TP}$ . Направление  $V_{TP}$  противоположно направлению равновесного поля, а его величина примерно пропорциональна  $I_{TP}$ . Кривая 5 на рис.3 показывает изменение во времени величины  $V_{TP}$  для модели азимутально-однородного бланкета с  $R_K = 2,4 \cdot 10^{-4}$  Ом. Этот результат получен при прежнем значении внешней вихревой э.д.с. на обходе бланкета, но при полном отсутствии наложенного равновесного поля.

Влияние параметра  $R_K$  на время  $t_E$ , необходимое для достижения половинного значения э.д.с. и на продолжительность существования обратного магнитного поля  $t_B$  иллюстрируется рис.4. Кривые  $t_E$  для обеих расчетных моделей практически совпадают. Модель азимутально-секционированного бланкета дает оценку  $t_B$  сверху, т.е.  $t_B^{max}$ , а модель однородного бланкета - оценку  $t_B$  снизу, т.е.  $t_B^{min}$ . Область промежуточных значений  $t_B$  выделена на рис.4 штриховкой.

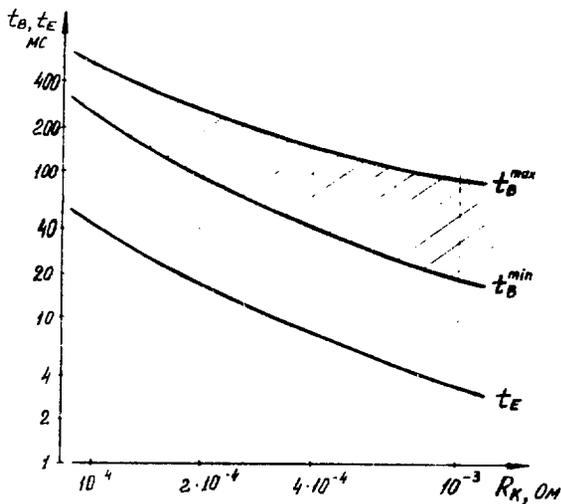


Рис.4. Влияние параметра  $R_K$  на задержку проникновения вихревой э.д.с. и вертикального магнитного поля.

Таким образом, для рассматриваемого диапазона изменения параметра  $R_K$  задержка проникновения равновесного магнитного поля внутрь разрядной камеры оказывается в несколько раз больше времени подъема напряжения на обходе плазменного шнура

( $t_B^{min} > 5t_E$ ). Столь существенное отличие величин  $t_B$  и  $t_E$  объясняется не только протеканием седловидных токов в секторах blanketа, но и существованием магнитного поля транспортного тока, направленного встречно по отношению к равновесному полю и дополнительно увеличивающего задержку  $t_B$ .

Величина  $V_{TR}$  и его экранирующее действие растут с увеличением прикладываемой к blanketу внешней вихревой э.д.с. и с уменьшением параметра  $R_K$ .

Указанные свойства blanketа реактора-токамака могут повлиять на выбор его конструкции (в частности, сопротивления сильфонов), а также на выбор режима работы ОПИ на начальном этапе старта разряда.

Авторы признательны Н.М.Дойникову за интерес к работе и ряд ценных критических замечаний.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Известно, что подход связанных электрических контуров предполагает предварительный выбор конфигурации контуров с неизвестными токами. В основе выбора конфигурации контуров для расчетной модели азимутально-секционированного бланкета лежит отмеченная в /3, 4/ закономерность распределения вихревых токов, заключающаяся в том, что при выполнении соотношений (I) ток в продольных частях секторов имеет преимущественно азимутальную составляющую, а распределение транспортного тока по периметру сильфона при  $R_c \gg R_a$  оказывается близким к однородному. Эта закономерность распределения токов позволяет описать азимутально-секционированный бланкет набором гальванически связанных между собой контуров, каждый из которых состоит из участков двух типов (см.рис.5): так называемых азимутальных участков, передающих структуру продольных стенок секторов, и общих участков, отражающих существование сильфонов. Все азимутальные участки соединяются с общими через малоиндуктивные и малорезистивные перемычки, передающие в соответствии с (I) свойства торцевых стенок секторов бланкета. Эквивалентная электрическая схема такой расчетной модели приведена на рис.6.

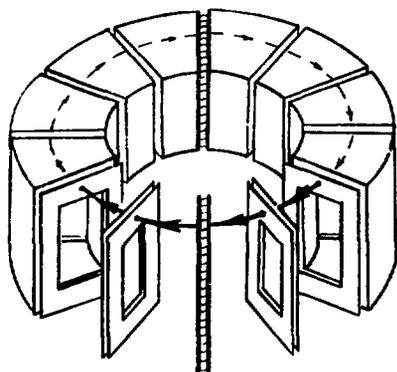


Рис.5. Конфигурация одного из контуров вихревых токов расчетной модели азимутально-секционированной структуры

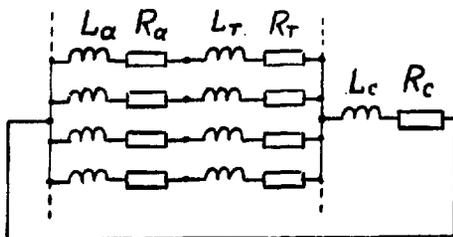


Рис.6. Эквивалентная электрическая схема расчетной модели азимутально-секционированной структуры

Рассмотренная модель может быть реализована в рамках существующих алгоритмов расчета переходных процессов в линейных осесимметричных системах. При этом в матрице активных сопротивлений появляются обусловленные гальванической связью контуров внедиагональные элементы:

$$|R| = \begin{vmatrix} (R_{11} + R_c) & R_c & R_c & \dots & R_c & 0 & \dots \\ R_c & (R_{22} + R_c) & R_c & \dots & R_c & 0 & \dots \\ R_c & R_c & (R_{33} + R_c) & \dots & R_c & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_c & R_c & R_c & \dots & (R_{nn} + R_c) & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & R_{n+1, n+1} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix}$$

где контуры с I-го по  $n$ -й принадлежат бланкету, а остальные - осесимметричным элементам реактора. Очевидно, что при  $R_c = 0$  рассмотренная модель сводится к осесимметричной.

## Список литературы

1. International Tokamak Reactor. Phase Two A. Part 1, - IAEA, Vienna, 1983.
2. Велихов Е.П., Глухих В.А. и др. Гибридный термоядерный реактор-токамак для производства делящегося топлива и электроэнергии. - Доклады I Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Т.1. Л., 1977, с.5-25.
3. USSR Contribution to the 8 th Session of INTOR Workshop, Phase Two A, Part 2, v.2. Moscow, January 1984, p.41-69.
4. Астапкович А.М., Дойников Н.И., Садаков С.Н. Расчет вихревых токов в blanketе реактора-токамака. III Всесоюзная конференция по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Т.4. - Л., 1984, с.215-223.
5. Астапкович А.М., Садаков С.Н. Алгоритм расчета коэффициентов собственной и взаимной индуктивности массивных коаксиальных контуров. - Л., 1984. - с.27 (Препринт/НИИЭФА: Б-0628).
6. Астапкович А.М., Садаков С.Н. Численное моделирование нестационарных электромагнитных процессов в несимметричных системах методом связанных контуров. - Л., 1984. - с. 16 (Препринт/НИИЭФА: Б-0636).

Александр Михайлович Астапкович  
Сергей Николаевич Садаков

АНАЛИЗ ПРОНИКНОВЕНИЯ МАГНИТНОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ  
ЧЕРЕЗ БЛАНКЕТ РЕАКТОРА-ТОКАМАКА НА СТАРТЕ РАЗРЯДА

Редактор В.Л.Гусева

---

Подписано в печать 15.07.85г. Т-12369. Формат 60x90/16.  
 Offsetная печать. Уч.-изд.л. 0,4. Тираж 150 экз.  
 Зак. № 133/104. Индекс 3624. Цена 6 к.

---

Отпечатано в НИИЭФА

Индекс 3624