

# Применение модулированных азимутально-периодических магнитных полей в индукционных циклических ускорителях

А.А. Звонцов, В.П. Казьмин  
НИИ интроскопии ТПУ, Томск, Россия

Управляющие магнитные поля с азимутальной вариацией широко применяются в ускорительной технике. Показывается, что дополнительная модуляция азимутально-периодических магнитных полей повышает их фокусирующие свойства. Модулированные поля достаточно просто формируются электромагнитами циклических ускорителей.

В действующих в настоящее время циклических ускорителях с азимутально-периодическим магнитным полем [1] применяется управляющее поле, индукцию которого для средней плоскости рабочего зазора с учетом только основной гармоники можно записать в виде

$$B_Z(r, \theta, z = 0) = B_{Z0} \left( \frac{r_0}{r} \right)^n \{1 + \varepsilon(r) \sin[\beta(r) - N\theta]\}, \quad (1)$$

где  $r, z, \theta$  — цилиндрическая система координат;  $B_{Z0}$  — усредненная по азимуту индукция на усредненном радиусе равновесной орбиты  $r_0$ ;  $N, \varepsilon(r), \beta(r)$  — число элементов периодичности, амплитуда и фаза основной гармоники поля;  $n$  — усредненный по азимуту показатель спада поля.

Такое поле относительно просто создается шиммированными полюсами в изохронных циклотронах [1], полюсами гребневого типа в бетатронах [2] или секторными электромагнитами.

Фокусирующие свойства управляющего поля обычно характеризуются частотами бетатронных колебаний, которые приближенно определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \nu_r^2 &\approx 1 - n, \\ \nu_z^2 &\approx n + \frac{1}{2}\varepsilon^2 + \varepsilon^2 \operatorname{tg}^2 \eta, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\eta$  — угол “спиральности” гребней. Реальное поле содержит гармонические составляющие частотой  $kN$ , где  $k$  — номер гармоники.

В действующих ускорителях амплитуды высших гармоник быстро уменьшаются с ростом их номера. Поэтому для повышения фокусирующих свойств азимутально-периодического поля целесообразно использовать специальные приемы, позволяющие увеличить амплитуды отдельных гармоник. Одним из таких приемов может быть дополнительная модуляция управляющего поля. Модуляция может быть амплитудной, частотной, амплитудно-частотной и других видов [3].

Рассмотрим влияние амплитудной модуляции на структуру азимутально-периодического магнитного поля циклических ускорителей.

Учитывая свойства модулированных колебаний [3], индукцию магнитного поля для плоскости  $z = 0$  в случае использования амплитудной гармонической модуляции можно записать в виде

$$B_Z(r, \theta, z = 0) = B_{Z0} \left( \frac{r_0}{r} \right)^n \{1 + \varepsilon(r) [1 + M(r) \cos(P\theta + \psi)] \cos(N\theta + \varphi)\}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon, N, \varphi$  — амплитуда, частота и фаза основной гармоники;  $P, \psi$  — частота и фаза модулирующей функции;  $M(r)$  — глубина модуляции (коэффициент, учитывающий степень изменения амплитуды).

Если принять для простоты  $\varphi = \psi = 0$ , то выражение (3) можно представить в виде

$$B_Z(r, \theta, z = 0) = B_{Z0} \left( \frac{r_0}{r} \right)^n \times \left\{ 1 + \varepsilon(r) \cos N\theta + \frac{1}{2} \varepsilon(r) M(r) \cos(N - P)\theta + \frac{1}{2} \varepsilon(r) M(r) \cos(N + P)\theta \right\}. \quad (4)$$

Таким образом, введение дополнительной амплитудной модуляции приводит к появлению в структуре поля боковых частот.

Рассмотрим влияние частотной модуляции на структуру управляющего поля. С учётом свойств частотно-модулированных колебаний [3] индукция магнитного поля в плоскости  $z = 0$  рабочего зазора ускорителя может быть представлена в виде

$$B_Z(r, \theta, z = 0) = B_{Z0} \left( \frac{r_0}{r} \right)^n \{1 + \varepsilon(r) \cos[N\theta + \varphi + L(r) \sin(P_f\theta + \lambda)]\}, \quad (5)$$

где  $P_f$  — частота дополнительного изменения периодической составляющей поля (модулирующая частота);  $L$  — коэффициент, учитывающий степень изменения частоты;  $\lambda$  — фаза модулирующей частоты. Согласно свойствам частотно-модулированных колебаний управляющее поле (5) содержит целый спектр боковых гармоник.

Кроме амплитудной или частотной дополнительной модуляции возможна одновременная модуляция и по амплитуде, и по частоте. В этом случае индукция магнитного поля изменяется по закону:

$$B_Z(r, \theta, z = 0) = B_{Z0} \left( \frac{r_0}{r} \right)^n \{1 + \varepsilon(r) [1 + M \cos(P\theta + \psi)] \cos[N\theta + \varphi + L(r) \sin(P_f\theta + \lambda)]\}, \quad (6)$$

где  $M$ ,  $P$ ,  $L$ ,  $P_f$  и другие параметры определены ранее.

Известно, что действие амплитудно-частотной модуляции можно рассматривать как действие амплитудной модуляции на набор гармоник.

Математическое моделирование управляющего поля по выражениям (3), (5), (6) показывает, что модулированные магнитные поля можно реализовать в ускорителях только в том случае, когда частота модулирующей функции  $P$  или  $P_f$  кратна частоте основной гармоники  $N$ , либо  $N$  и  $P$  содержат общий множитель. При выполнении этих условий частоты боковых гармоник будут целыми числами. Последнее обстоятельство упрощает формирование таких полей.

Введение модуляции приводит к изменению числа элементов периодичности управляющего поля и к усложнению структуры поля внутри этого элемента периодичности. Число элементов поля становится равным частоте модулирующей функции  $P$ , если  $P$  кратна  $N$ , или равным значению общего множителя для чисел  $N$  и  $P$ . Так, при  $N = 6$  и  $P = 4$  число элементов периодичности поля будет равно 2.

Диапазон изменения коэффициентов  $M$  и  $L$  достаточно широк, но с увеличением абсолютных значений  $M$  и  $L$  структура поля внутри одного элемента периодичности усложняется, что затрудняет его формирование. В качестве примера на рис. 1 показано изменение индукции поля при введении амплитудной и частотной модуляции.

Таким образом, выбирая параметры основной и модулирующей функций и значения коэффициентов  $M$  и  $L$ , можно в широком диапазоне менять спектральный состав управляющего поля. Современная компьютерная техника позволяет оперативно просмотреть достаточно большое количество вариантов структуры поля и выбрать наиболее приемлемый для реализации.

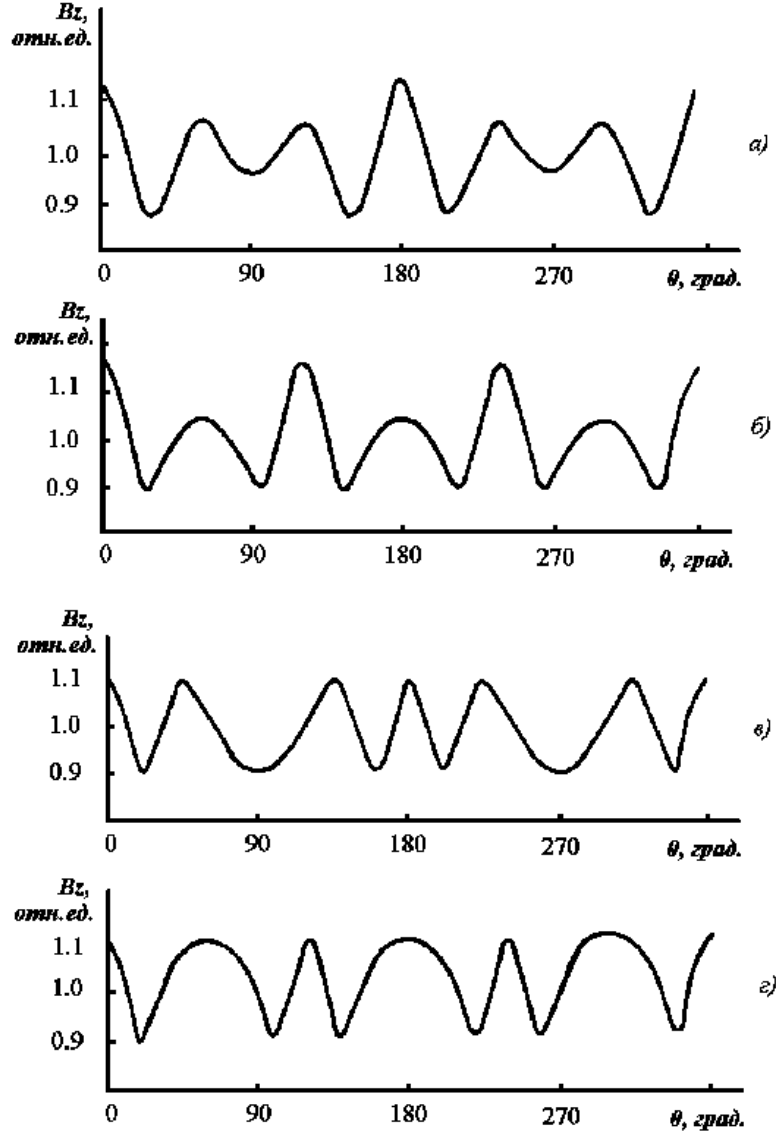


Рис. 1: Изменение индукции поля в зависимости от частоты модулирующих функции  $P$  и  $P_f$  при  $N = 6$ ,  $\varepsilon = 0.1$ ,  $M = 0.6$ ,  $P = 2$  (а),  $P = 3$  (б) и  $L = 1.5$ ,  $P_f = 2$  (а),  $P_f = 3$  (г).

Основной особенностью рассмотренных управляющих полей с дополнительной модуляцией является факт появления в спектральном составе поля низших гармоник. Целесообразно рассмотреть такое поле, в котором кроме основной гармоники имеется одна низшая гармоника. В этом случае индукция поля в средней плоскости рабочего зазора меняется по закону:

$$B_Z(r, \theta, z = 0) = B_{Z0} \left( \frac{r_0}{r} \right)^n [1 + \varepsilon_1 \cos(N\theta + \varphi) + \varepsilon_2 \cos(P\theta + \psi)] \quad , \quad (7)$$

где  $\varepsilon_1, \varphi, \varepsilon_2, \psi$  — амплитуды и фазы основной и низшей гармоник соответственно.

Моделирование показывает: если частоты  $N$  и  $P$  кратны между собой или содержат общий множитель, то магнитное поле становится модулированным по азимутальной координате. Низшую гармонику можно считать основной практически уже при  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ .

Частоты бетатронных колебаний, характеризующие фокусирующие свойства поля бетатронов, можно приближенно определять по известным формулам. Заметим, что управляющие

поля, содержащие основную и низшую гармоники, используются в изохронных циклотронах для организации вывода ускоренных частиц [4].

Анализ показывает, что управляющие магнитные поля с дополнительной модуляцией можно использовать в бетатронах, изохронных циклотронах и кольцевых фазотронах.

Введение дополнительной модуляции азимутально-периодического магнитного поля приводит к изменению амплитуд индукции в экстремальных точках и азимутальной протяженности отдельных участков поля. В электромагнитах ускорителей такие поля можно сформировать следующим образом:

- 1) периодическим изменением по азимуту ширины отдельных гребней полюсов в бетатронах, шимм или секторов в циклотронах;
- 2) периодическим изменением по азимуту межполюсного зазора, образованного отдельными гребнями, шиммами или секторами;
- 3) периодическим изменением углового расстояния между осями двух соседних гребней, шимм или секторов;
- 4) периодическим чередованием гребней, шимм или секторов, выполненных из материалов с разными ферромагнитными свойствами;
- 5) изменением конфигурации или намагничивающей силы отдельной группы корректирующих витков “гармонического” типа.

Математическое и физическое моделирование показывает, что применение модулированных управляющих полей наряду с увеличением фокусирующих сил может дать дополнительные полезные эффекты: снижение габаритов и массы магнитопровода, упрощение технологии изготовления, улучшение условий вывода ускоренных частиц и улучшение условий охлаждения электромагнита.

Таким образом, управляющие азимутально-периодические поля с дополнительной модуляцией целесообразно использовать в ускорительной технике, так как они характеризуются повышенными фокусирующими свойствами, просто формируются и описываются аналитически. Последнее обстоятельство упрощает их исследование.

Модулированные управляющие поля являются дальнейшей модификацией магнитных полей с азимутальной вариацией, подобно тому как в ускорителях с сильной фокусировкой существуют различные способы установки фокусирующих и дефокусирующих секторов (ФД, ФОДО, ФДФДОД).

## Список литературы

- [1] Комар Е.Г. Основы ускорительной техники. – М.: Атомиздат, 1975. 386 с.
- [2] А.С. 360008 СССР, МКИ Н05 Н 11/00 Электромагнит бетатрона. В.Л. Чахлов, А.А. Звонцов, А.А. Филимонов. Оpubл. в БИ, 1984, N 6, с. 216.
- [3] Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Сов. радио, 1977, 607 с.
- [4] Дмитриевский В.П., Кольга В.В., Полумордвинова Н.И. – Дубна, 1965. - 18с. – Препринт ОИЯИ Р, 1981.