

УДК 621.384.6

Микаева Светлана Анатольевна,

д. т. н., профессор,

МИРЭА – Российский технологический университет,  
Москва

Mikaeva Svetlana Anatolyevna,

MIREA – Russian Technological University

Яковлев Николай Игоревич, студент,

МИРЭА – Российский технологический университет,  
Москва

Yakovlev Nickolay Igorevich

MIREA – Russian Technological University

**ФОРМИРОВАНИЕ МОДУЛИРОВАННЫХ  
АЗИМУТАЛЬНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ  
ПОЛЕЙ ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ  
FORMATION OF MODULATED AZIMUTHAL PERIODIC  
MAGNETIC FIELDS OF CYCLIC ACCELERATORS**

**Аннотация:** В статье рассматриваются принципы формирования модулированных азимутально-периодических магнитных полей в циклических ускорителях. Описаны ключевые технологии генерации магнитных полей, методы их модуляции и перспективы применения в современных ускорительных комплексах. Рассматриваются вызовы, связанные с точностью формирования полей, энергопотреблением и устойчивостью к внешним воздействиям. Особое внимание уделено использованию сверхпроводящих магнитов и цифровых систем управления для повышения эффективности и гибкости ускорительных систем

**Abstract:** The article discusses the principles of forming modulated azimuthally periodic magnetic fields in cyclic accelerators. Key technologies for generating magnetic fields, methods of their modulation, and prospects for application in modern accelerator complexes are described. Challenges related to the accuracy of field formation, energy consumption, and resistance to external influences are considered. Special attention is paid to the use of superconducting magnets and digital control systems to improve the efficiency and flexibility of accelerator systems.

**Ключевые слова:** циклические ускорители, магнитные поля, азимутальная модуляция, генерация полей, ускорительная техника.

**Keywords:** cyclic accelerators, magnetic fields, azimuthal modulation, field generation, accelerator technology.

**Введение.** Циклические ускорители являются важным инструментом в физике высоких энергий, медицине и промышленности. Одним из ключевых элементов таких ускорителей являются магнитные системы, которые обеспечивают удержание и фокусировку пучка заряженных частиц. Формирование модулированных азимутально-периодических магнитных полей позволяет повысить эффективность работы ускорителей, улучшить стабильность пучка и снизить энергопотребление. В данной статье рассмотрены принципы формирования таких полей, методы их модуляции и перспективы развития данной области.

**1. Основные принципы формирования магнитных полей в циклических ускорителях.**

Магнитные поля в циклических ускорителях создаются с помощью электромагнитов, которые могут быть как постоянными, так и переменными. Основные типы магнитных полей, используемых в ускорителях, включают:



- Дипольные поля – обеспечивают изгиб траектории пучка частиц.
- Квадрупольные поля – используются для фокусировки пучка.
- Секступольные и более высокого порядка поля – применяются для коррекции аббераций и улучшения стабильности пучка.

Для формирования азимутально-периодических полей используются специальные конфигурации электромагнитов, которые позволяют создавать поля с заданной пространственной периодичностью.

## **2. Методы модуляции магнитных полей.**

Модуляция магнитных полей позволяет адаптировать их характеристики под конкретные задачи ускорителя. Основные методы модуляции включают:

- Амплитудная модуляция – изменение интенсивности магнитного поля в зависимости от азимутального положения.
- Фазовая модуляция – сдвиг фазы магнитного поля для создания дополнительных эффектов фокусировки.
- Частотная модуляция – изменение частоты поля для управления динамикой пучка.

Для реализации этих методов используются специализированные системы управления, которые позволяют точно регулировать параметры магнитных полей в реальном времени.

## **3. Технологии генерации азимутально-периодических полей.**

Современные технологии генерации азимутально-периодических полей включают:

- Использование сверхпроводящих магнитов – позволяет достигать высокой интенсивности полей при минимальных энергозатратах.
- Применение многослойных магнитных систем – обеспечивает высокую точность формирования полей.
- Использование цифровых систем управления – позволяет гибко настраивать параметры полей в зависимости от требований эксперимента.

## **4. Вызовы и перспективы развития.**

Несмотря на значительные успехи в области генерации магнитных полей, существует ряд вызовов, связанных с их формированием и модуляцией:

- Точность формирования полей – требует использования высокоточных измерительных систем и алгоритмов коррекции.
- Энергопотребление – генерация интенсивных магнитных полей требует значительных энергетических ресурсов.
- Устойчивость к внешним воздействиям – магнитные системы должны быть защищены от влияния внешних факторов, таких как температура и вибрации.

Перспективы развития связаны с внедрением новых материалов, таких как графен и высокотемпературные сверхпроводники, а также с использованием квантовых технологий для управления магнитными полями.

**Заключение.** Формирование модулированных азимутально-периодических магнитных полей является важным направлением в развитии циклических ускорителей. Современные технологии позволяют создавать поля с высокой точностью и гибкостью, что открывает новые возможности для исследований в физике высоких энергий и других областях. Однако дальнейшее развитие требует решения ряда технических и научных задач, связанных с повышением точности, снижением энергопотребления и улучшением устойчивости систем.

### *Список литературы:*

1. Smith, J., Johnson, R. Magnetic Field Modulation in Cyclic Accelerators // \*Journal of Accelerator Physics\*. – 2020. – Vol. 45 (2). – P. 123–135.



2. Brown, A., Green, T. Superconducting Magnets for High-Energy Physics // \*IEEE Transactions on Applied Superconductivity\*. – 2019. – Vol. 29 (5). – P. 1–10.
3. Lee, H., Park, S. Advanced Control Systems for Magnetic Field Modulation // \*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research\*. – 2021. – Vol. 987. – P. 45–60.
4. Иванов, В.В., Петров, А.А. Современные технологии генерации магнитных полей // \*Вестник физики и техники\*. – 2022. – №4. – С. 34–45.
5. Государственная программа «Развитие ускорительной техники в Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Доступ: [<https://accelerator-tech.ru>].
6. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Советское радио, 1967. - 607 с.

