

3. Разработан также прибор для контроля перемещаемых по нефтепроводу очистных устройств (скребков, приборов внутритрубной диагностики и т.д.) СПРА-4. Данный прибор предназначен для определения момента прохождения очистного устройства, перемещаемого по магистральному нефтепроводу. Прибор включает в себя датчик (для установки на нефтепровод), анализатор, блок внешнего подключения, переносное устройство сигнализации, блок питания, приспособление для крепления датчика на трубе (магнитный держатель). Принцип работы прибора также основан на регистрации акустического излучения (шума), сопровождающего перемещение очистного устройства по нефтепроводу в ультразвуковом диапазоне частот. Прибор СПРА-4 может работать как в составе АСУ трубопроводного транспорта, так и автономно. Для установки прибора не требуется врезка в стенку трубы нефтепровода. Прибор СПРА-4 нашел широкое применение в отраслях нефтяной и газовой промышленности при эксплуатации магистральных трубопроводов. Прибор выпускается Томским электротехническим заводом.

Основными заказчиками данных приборов являются ОАО "Магистральные нефтепроводы Центральной Сибири" (Томск) и трубопроводные управления Российской акционерной компании "Транснефть".

В настоящее время в институте ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию стационарной многоканальной акустико-эмиссионной аппаратуры для автоматизированной технической диагностики линейной части потенциально опасных участков нефтепроводов.

УДК 621.384.634

В. А. МОСКАЛЕВ, Г. И. СЕРГЕЕВ

### БЕТАТРОН НА ЭНЕРГИЮ 500 МЭВ

На основе предложенного и разработанного в НИИ интроскопии способа компенсации потерь энергии на синхротронное излучение проведена оценка основных параметров высокоэнергетического бетатрона. В качестве магнитной системы такого бетатрона выбрана система ведущего поля слабофокусирующего синхротрона, модифицированная с учетом последних достижений по ускорению килоамперных токов введением торондального и стеллараторного магнитных полей. В связи с огромной мощностью ускорителя для питания электромагнита использован генератор импульсов тока на основе ударного генератора с индуктивным накопителем.

Проведенные расчеты показали, что средний радиус такого ускорителя составит (с учетом промежутков под индукторами)  $(2,19 \pm 0,01)$  м. Диаметр излучателя 7,58 м, а его высота, определяемая индукторами, 3,2 м. Масса управляющих магнитов – 55 т, а масса шести индукторов – 181 т.

Следует отметить уникальные параметры пучка. Энергия, приобретаемая пучком за один цикл ускорения, составит 20 кДж. При работе такого ускорителя с периодичностью 50 циклов в секунду средняя мощность пучка составит один мегаватт. КПД ускорителя оценивается примерно в 80 %.

Индукционный циклический ускоритель электронов – бетатрон – давно и успешно используется в промышленности и в научных исследованиях, несмотря на то, что он уступает по интенсивности линейному ускорителю. Это объясняется его достоинствами – простотой и экономичностью.

Новый этап в развитии бетатростроения начался в 80-х годах, когда была поставлена задача по ускорению килоамперных токов и достижению средней мощности пучка от сотен киловатт до десятков мегаватт. Для ускорения токов порядка тысяч ампер требуется низкоимпедансный метод ускорения. Индукционный метод ускорения, который используется в бетатронах, принципиально низкоимпедансный и лучше подходит для ускорения килоамперных токов, чем резонансный высокочастотный метод. Кроме того, слабофокусирующая магнитная структура, которая обычно используется в бетатронах, предпочтительнее сильнофокусирующей, так как ее относительно большая оптическая дисперсия позволяет использовать механизм затухания Ландау для управления коллективными неустойчивостями пучка.

В настоящее время работы по индукционному ускорению больших токов проводятся по трем направлениям [1,2]: 1) разработка рециркуляторных ускорителей на энергию 10 МэВ током 10 кА; 2) разработка модифицированных бетатронов на энергии в сотни МэВ с током порядка одного килоампера; 3) создание цилиндрического (в зарубежной литературе используется термин "elongated" – растянутого) бетатрона.

В отличие от обычных ускорителей в сильноточных ускорителях в большей степени проявляются эффекты, связанные с собственными электрическим и магнитным полями ускоряемого пучка. При

этом многие ключевые физические эффекты, наблюдаемые в сильноточных ускорителях, подобны эффектам, известным из физики плазмы. Поэтому при модификации бетатронов используются технологии, которые были разработаны для физических установок по удержанию плазмы в магнитных полях.

К настоящему времени лучшие экспериментальные результаты получены в лаборатории военно-морских исследований (NRL, Вашингтон) на модифицированном бетатроне МВА, где в комбинации бетатронного, тороидального и стеллараторного полей ускорен ток в 1,1 кА до энергии 22 МэВ [3]. В лучших образцах бетатронов Томского политехнического университета был ускорен пучок с током

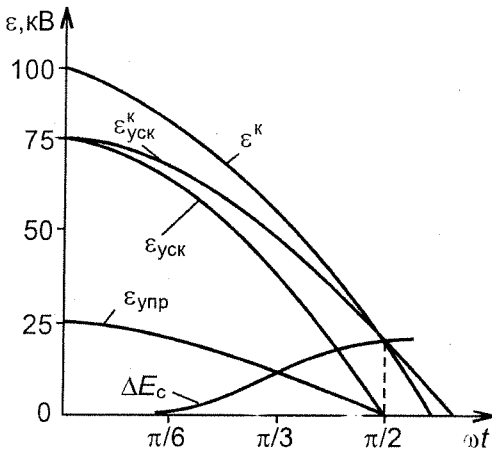


Рис. 1

около двухсот ампер до энергии 50 МэВ. Анализ имеющегося теоретического задела и экспериментальных результатов показывает, что проблема создания и удержания на орбите бетатрона килоамперных токов решаема. Другой проблемой теории и техники индукционного ускорения электронов является проблема увеличения предельной энергии частиц. Самый большой в истории бетатрон на энергию 300 МэВ был сооружен в США в 1950 г. Эта энергия в 300 МэВ и стала практически предельно достижимой для индукционных циклических ускорителей, так как при более высоких энергиях, как было предсказано Д.Д.Иваненко и И.Я.Померанчуком [4], нарушаются условия нормальной работы бетатрона вследствие потери электронами части энергии на синхротронное излучение.

В настоящей работе предпринята попытка оценить возможность создания бетатрона на 500 МэВ на основе предложенного и разработанного в НИИ интроскопии ТПУ способа компенсации потерь энергии на синхротронное излучение [5, 6]. Суть метода сводится к следующему: индуцируемые магнитным полем бетатрона ускоряющая  $\epsilon_{\text{уск}}$  и управляющая  $\epsilon_{\text{упр}}$  ЭДС изменяются синхронно по косинусоидальному закону и в конце цикла ускорения при  $\omega t = \pi/2$  равны нулю (рис. 1), в то время как величина энергии  $\Delta E_c$ , которая уносится электромагнитным излучением при совершении электроном одного оборота по орбите, возрастает с ростом энергии электронов  $E$  пропорционально  $E^4$  и достигает максимума в конце цикла ускорения. По мере приближения величины  $\Delta E_c$  к значению  $\epsilon_{\text{уск}} \cdot \cos \omega t$  прирост энергии электрона по сравнению с требуемым приростом энергии для движения электрона по равновесной орбите в возрастающем магнитном поле уменьшается, что приводит к сокращению радиуса траектории. Электрон начнет двигаться по свертывающейся спирали, что в конце концов вызовет соударение электрона с внутренней стенкой вакуумной камеры, и электрон выйдет из ускорения.

Для восполнения потерь энергии электроном на синхротронное излучение было предложено разделить магнитные потоки, возбуждающие ускоряющую  $\epsilon_{\text{уск}}$ , управляющую  $\epsilon_{\text{упр}}$  ЭДС и увеличить ускоряющую ЭДС  $\epsilon_{\text{уск}} \cdot \cos \omega t$  на величину  $\Delta E_c$ . Кривая  $\epsilon_{\text{уск}}^k$  на рис. 1 представляет собой сумму  $\epsilon_{\text{уск}}^k = \epsilon_{\text{уск}} + \Delta E_c$ , которая приравнена к косинусоиду с новой частотой  $\omega_{\text{уск}}$ . Усредненная по орбите ускоряющая ЭДС в этом случае достаточно точно описывается формулой

$$\epsilon^k = \epsilon_{\text{уск}} \cdot \cos \omega_{\text{уск}} \cdot t + \epsilon_{\text{упр}} \cdot \cos \omega_{\text{упр}} \cdot t, \quad (1)$$

где  $\omega_{\text{уск}}$  — угловая частота ускоряющего поля, а  $\omega_{\text{упр}}$  — угловая частота управляющего магнитного поля.

Для соотношения частот  $\omega_{\text{уск}}$  и  $\omega_{\text{упр}}$  получено следующее выражение:

$$\omega_{\text{уск}} / \omega_{\text{упр}} = (2/\pi) \arccos(\Delta E_{\text{сн}} / \epsilon_{\text{уск}} |_{\alpha=0}). \quad (2)$$

Проведенные расчеты показали, что в случае разделения управляющего и ускоряющего магнитных полей и возбуждения этих полей с разными приведенными частотами практически всегда в диапазоне энергий 300–1000 МэВ можно подобрать такое соотношение частот, при котором условия устойчивого движения электронов на равновесной орбите будут сохраняться в заданных пределах до конца цикла ускорения.

Классическая конфигурация электромагнита бетатрона оказывается неприемлемой для высокоэнергетического ускорителя по двум причинам: во-первых, у такого электромагнита очень быстро растет его масса при увеличении конечной энергии ускоряемых частиц, и, во-вторых, в классической конструкции электромагнита сложно осуществить разделение электромагнитных потоков, необходимое для компенсации потерь энергии электронами на синхротронное излучение.

Известны три способа разделения магнитных цепей в индукционных циклических ускорителях [7–9]. Математический аппарат во всех трех случаях одинаков. Анализ схем разделения магнитных цепей показал, что по массо-габаритным параметрам для высокоэнергетического ускорителя лучшим является вариант ускорителя, описанный М.С.Хвастуновым [7], который необходимо модифицировать с учетом последних достижений по ускорению килоамперных токов, то есть дополнительно ввести тороидальное и стеллараторное магнитные поля.

С учетом вышесказанного, в качестве магнитной системы высокоэнергетического бетатрона выбрана система ведущего поля слабофокусирующего синхротрона (рис.2). Ускоряющими элементами являются ферромагнитные сердечники-индукторы 1, которые размещаются в прямолинейных промежутках ускорителя и возбуждают ускоряющую ЭДС  $\epsilon_{\text{уск}}$ . Управляющее поле создается электромагнитами 2, которые возбуждают ЭДС  $\epsilon_{\text{упр}}$ . Усредненная по орбите ускоряющая ЭДС описывается выражением (1). В этом случае индекс "уск" относится к индукторам, а индекс "упр" — к электромагнитам.

Так как кривая по уравнению (1) в действительности несколько отличается от косинусоиды, на практике будут наблюдаться колебания мгновенного значения  $R_0$  относительно расчетного значения положения радиуса равновесной орбиты. Критерием устойчивой работы ускорителя в этом случае является допустимое отклонение мгновенной орбиты частиц от равновесной. Положение мгновенной орбиты  $R_{0м}$  определяется как

$$R_{0м} = (E - E_c) / 300 B_0 \quad (3)$$

где  $E$  — энергия ускоряемых частиц в данный момент времени;  $E_c$  — суммарные потери энергии на синхротронное излучение в этот же момент времени;  $B_0$  — индукция на радиусе  $R_0$ .

Проведенные расчеты показали, что максимальное отклонение мгновенной орбиты  $R_{0м}$  от расчетного положения приходится на угол  $\omega t$ , равный  $50^\circ$ . К этому моменту времени электроны ускоряются до 80% от максимальной энергии, то есть максимум отклонения  $R_{0м}$  будет наблюдаться в сфокусированном пучке. А так как в ускорителях со слабой фокусировкой для захвата в ускорение большего числа частиц сечение вакуумной камеры увеличено, то незначительное отклонение сфокусированного пучка от расчетного положения не приведет к потере частиц из ускорения.

В качестве исходных данных разрабатываемого бетатрона на энергию 500 МэВ были приняты следующие параметры:

зазор на радиусе равновесной орбиты, см	15
показатель спада магнитного поля	0,6
индукция в стали магнитов, Тл	1,6
индукция в стали индукторов, Тл	3,0
циркулирующий ток, кА	1
приведенная частота возбуждения магнита, Гц	200
частота повторения циклов ускорения, Гц	50

Средний радиус такого ускорителя составит (с учетом промежутков под индукторами)  $2,19 \pm 0,01$  м. Диаметр излучателя 7,58 м, а его высота, определяемая индукторами, — 3,2 м. Масса управляющих магнитов — 55 т, а масса шести индукторов — 181 т.

Масса активной стали в рассматриваемом ускорителе больше, чем в синхротроне, но значительно меньше, чем в бетатроне, имеющем классическую конфигурацию электромагнита. Этот недостаток окупается, по крайней мере, двумя условиями. Во-первых, ускоряющая система индукционного ускорителя проще и экономичнее синхротронной. И, во-вторых, и это главное, индукционный ускоритель позволяет получать уникальные параметры пучка. Энергия, приобретаемая пучком за один цикл ускорения, равна 20 кДж. При работе такого ускорителя с периодичностью 50 циклов в секунду средняя мощность пучка составит один мегаватт. КПД ускорителя оценивается примерно в 80 %.

В связи с огромной мощностью ускорителя особое внимание было уделено повышению его КПД. Для возбуждения электромагнита бетатрона в настоящее время наиболее широко используются источ-

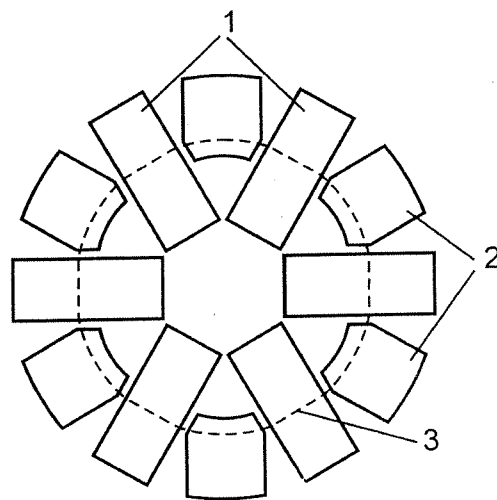


Рис.2

ники тока с накопителями в виде конденсаторной батареи. Однако следует указать, что запасаемая в конденсаторах плотность энергии мала, что приводит к увеличению габаритов установки. Стоимость сооружения батареи в 1,5–2 раза выше стоимости конденсаторов. По энергозапасу конденсаторные батареи, как правило, не превышают 5–10 МДж.

С увеличением применяемых энергий целесообразным видится применение электромеханических источников питания, в которых накопление энергии производится в маховых массах электрических машин при сравнительно небольшой мощности приводного двигателя. Удельная стоимость накопленной энергии в таких машинах наименьшая по сравнению с другими источниками питания, причем по мере увеличения запасаемой энергии ее удельная стоимость уменьшается. В связи с вышесказанным для питания электромагнита высокоэнергетичного ускорителя рассмотрено использование генератора импульсов тока на основе ударного генератора с индуктивным накопителем. Такое сочетание ударного генератора и индуктивного накопителя позволяет значительно увеличить запасаемую в генераторе тока энергию. Например, при соотношении индуктивного сопротивления накопителя  $X_n$  и ударного индуктивного сопротивления  $X_{уд}$  генератора  $X_n / X_{уд} = 8$  в накопителе можно сосредоточить энергию, равную 3,75 энергии внезапного короткого замыкания генератора [10]. У авторов имеются определенные наработки в виде патентов Российской Федерации по устройствам возбуждения электромагнитной системы бетатронов с индуктивными накопителями [11, 12].

Зона интересов ожидаемых результатов данной работы подробно рассмотрена в работе [1]. Отметим лишь, что рассматриваемый ускоритель может быть использован для создания сверхмощных СВЧ-генераторов и в качестве источника интенсивного синхротронного излучения. Такие ускорители позволят снизить стоимость единицы излучения, а также найдут ряд новых перспективных направлений их использования, таких, как зондирование атмосферы, вулканизация силиконов, крекинг сырой нефти, сжигание ядерных отходов и т.п.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kapetanakis C. A., Dialetis D., Marsh S. J. et al // Physical Review – 1991. – V.44. – № 6. – P.3900-3906.
2. Song Y., Fisher A., Prohaska R. et al // Physical Fluids. – 1992. – B.4. – № 11. – P. 3771-3780.
3. Kapetanakis C. A., Len L. K., Smith T. et al // Physical Fluids – 1991. – V.3. – № 8. – P.2396-2402.
4. Иваненко Д. Д., Померанчук И. Я. // Доклады АН СССР. – 1944. – Т.4. – С.343-348.
5. Сергеев Г. И., Шестаков В. Г. Способ ускорения электронов в бетатроне. / А.С. СССР № 1692297.
6. Москалев В. А., Сергеев Г. И., Шестаков В. Г. // ЖТФ. – 1993. – Т.63. – В.8. – С.172-176.
7. Звонцов А. А., Кунцын Г. А. Электромагнит бетатрона с разделенными магнитными цепями. / А.С. СССР № 1662330.
8. Москалев В. А., Сергеев Г. И., Шестаков В. Г. Многопучковый индукционный ускоритель электронов. / А.С. СССР № 1807833.
9. Хвастунов М. С. // Приборы и техника эксперимента, 1981. – №3.
10. Сипайлов Г. А., Хорьков К. А. Генераторы ударной мощности. М.: Энергия, 1979.
11. Москалев В. А., Пустынников С. В., Сергеев Г. И. Генератор импульсов тока. / Патент РФ №2017329.
12. Пустынников С. В., Сергеев Г. И., Сипайлов Г. А. Электромагнитная система индукционного ускорителя. / А.С. СССР №1704606.

УДК 620.179

В. К. КУЛЕШОВ, В. Н. ЛАНШАКОВ, А. К. ЗАЙЦЕВ, Л. Э. КОВАЛЕВА

### РОЛЬ ВТОРИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ В РАЗВИТИИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ ГРП

В работе рассмотрены два ионизационных процесса, ассоциативная ионизация и фотоионизация атомов резонансными фотонами, распространяющимися на крыльях спектральных линий, на предмет их роли в качестве вторичных механизмов в развитии газового разряда в условиях ГРП. Установлено, что второй механизм может играть существенную роль в развитии стримерного разряда и способен объяснить распространение катодонаправленного стримера.

#### Введение

Газовый разряд в ГРП инициируется рентгеновским или высокоэнергетическим тормозным излучением. После подачи на электроды импульса высокого напряжения, из областей первичной ионизации в газе развиваются электронные лавины, что приводит к усилению изображения.