

МЕТОД УВЕЛИЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПУЧКА
УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В СИНХРОТРОНЕ

З. Л. Артемьева, Е. М. Мороз, К. Н. Шорин

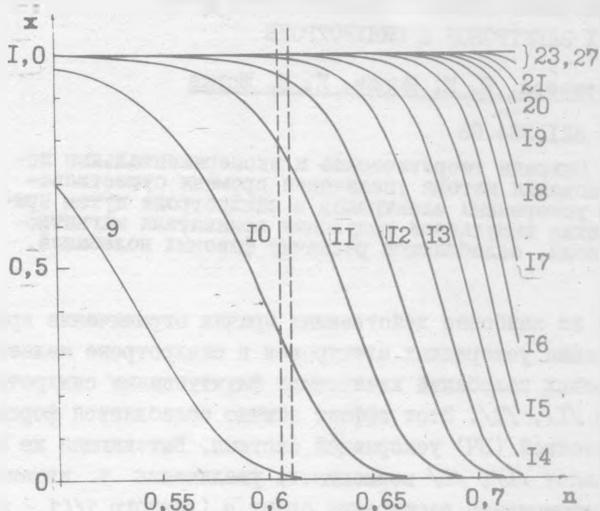
УДК 621.384.63

Описаны теоретические и экспериментальные исследования метода увеличения времени существования ускоренных электронов в синхротроне путем применения импульсной модуляции показателя магнитного поля, ослабляющей раскачку фазовых колебаний.

Одной из наиболее действенных причин ограничения времени существования ускоренных электронов в синхротроне является раскачка фазовых колебаний квантовыми флуктуациями синхротронного излучения /1/, /2/. Этот эффект обычно ослабляется форсировкой высокочастотной (ВЧ) ускоряющей системы. Вытекающая же из соотношений работ /1/, /2/ возможность увеличения τ изменением величины коэффициента расширения орбит α (равного $1/(1 - \mu)(1 + \lambda)$) для слабофокусирующего ускорителя, где μ и λ — показатель магнитного поля и относительная длина прямолинейных участков) используется обычно в незначительной степени, так как величина α , определяемая конструкцией установки, должна быть согласована с большим числом параметров ускорителя в разных фазах цикла ускорения.

Учитывая, что раскачка синхротронных колебаний становится особенно существенной к концу магнитного цикла, представляется целесообразным подавлять этот эффект в синхротронах путем импульсного изменения величины α вблизи вершины каждого цикла магнитного поля. Для синхротрона ФИАН с энергией ~ 600 МэВ /3/ авторами разработана и исследована на пучке ускорителя система импульсной модуляции показателя поля μ на плоской вершине магнитного цикла, обеспечивающая существенное ослабление раскачки фазовых колебаний и соответственное увеличение τ , проявляющиеся в уменьшении (практически до нуля) потерь ускоренных частиц без какой-либо форсировки ВЧ системы.

На рис. 1 приведены вычисленные с помощью соотношений работ /1/, /2/ кривые зависимости доли X частиц, сохранившихся к концу идеально плоского участка длительностью $T = 0,5$ с магнитного цикла синхротрона ФИАН при энергии ускоренных электронов 577 МэВ, от

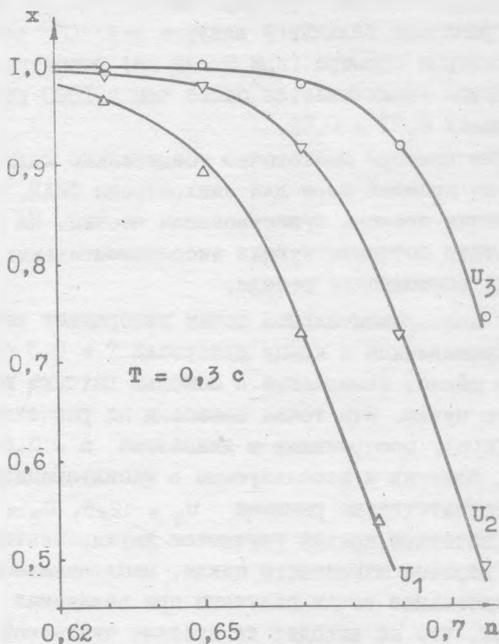


Р и с. 1. Расчетная зависимость доли X электронов (с энергией 577 МэВ), оставшихся на орбите к концу интервала $T = 0,5$ с нахождения на идеально плоской вершине магнитного цикла синхротрона, от показателя поля n при разных значениях напряжения на ускорителе резонаторе (9 + 27 кВ). Пунктирные прямые — линии опасных бетатронных резонансов, могущих ограничить область модуляции показателя n

показателя поля n , модулируемого в пределах $0,71 \pm 0,5$, для величин напряжения на резонаторе ускоряющей системы 9 + 27 кВ. Здесь же пунктирными линиями нанесены линии опасных резонансов бетатронных колебаний, могущих ограничить допустимые пределы модуляции n .

Из приведенных графиков и соответствующих расчетов следует, например, что при напряжении на резонаторе 18 кВ и значении $n \sim 0,71$ потери $I - X$ пучка, составляющие $\sim 30\%$ за время 0,5 с нахождения на плоской вершине магнитного цикла, могут быть уменьшены

до незначительного уровня $\sim 0,04\%$ путем уменьшения показателя α всего лишь на 10% до $\alpha \sim 0,64$ (соответствующие параметры модулирующего импульса в обмотках системы - 550 В, 10 А). Снижение же



Р и с. 2. Расчетные зависимости $X(n)$ при напряжениях на ускоряющем резонаторе $U_1 = 12,5$, $U_2 = 13,75$, $U_3 = 15,25$ кВ и экспериментальные точки (по измерениям с помощью датчика интенсивности пучка электронов на орбите) в сопоставимых режимах работы синхротрона

потерь до указанного уровня путем форсировки ВЧ системы требует полуторакратного увеличения напряжения на резонаторе (с 18 до 27 кВ), что в описываемых условиях синхротрона ФИАН представляет уже значительные трудности. В то же время для сохранения величины потерь за 0,5 с на том же уровне $I-X \sim 0,04\%$ рабочее напряжение на резонаторе может быть снижено от 27 кВ, необходимых при

$n \sim 0,71$ до 12 кВ при модуляции n на величину $\Delta n = 0,2$, что существенно облегчает режим работы ВЧ системы.

В первом из двух приведенных примеров расчетное время существования пучка при $n \sim 0,71$ и $U \sim 18$ кВ составляет 3,35 с. Расчетное время существования при переходе к $n \sim 0,64$ возрастает в ~ 50 раз и ограничено величиной вакуума $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ тор в камере синхротрона. Во втором примере (при $U \sim 12$ кВ) расчетное время τ существования пучка увеличивается более чем в 1000 раз при модуляции n в пределах $0,71 \pm 0,51$.

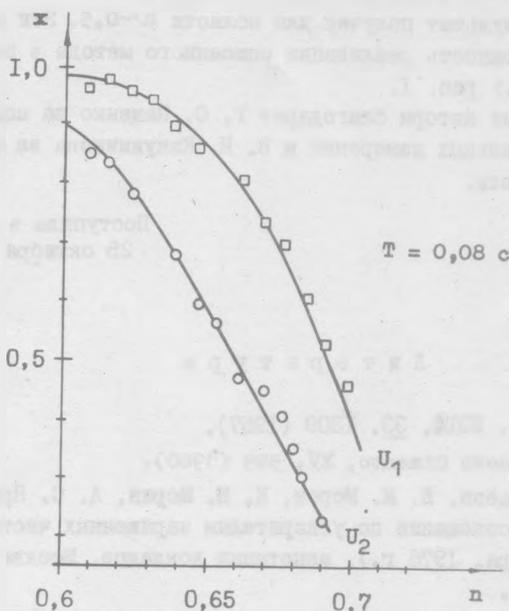
Приведенные примеры достаточно убедительно иллюстрируют эффективность, по крайней мере для синхротрона ФИАН, описываемого метода увеличения времени существования частиц. На рис. 2, 3 приведены результаты соответствующих экспериментальных исследований, подтверждающих возможности метода.

На рис. 2 экспериментальные точки изображают значения доли X частиц, сохранившихся к концу интервала $T = 0,3$ с плоской вершины магнитного цикла, измеренные с помощью датчика интенсивности циркулирующего пучка. Эти точки нанесены на расчетные кривые зависимостей $X(n)$, построенные в диапазоне $n = 0,62 \pm 0,71$ при значениях U , близких к используемым в эксплуатационном режиме и принятым соответственно равными $U_1 = 12,5$, $U_2 = 13,75$, $U_3 = 15,25$ кВ. Расчетные кривые учитывают двухпроцентный спад величины поля на вершине магнитного цикла, наблюдавшийся в эксперименте. Экспериментальные точки получены при величинах U на $5 \pm 8\%$ выше расчетных, что не выходит за пределы ожидаемой погрешности $\sim 10\%$ абсолютной калибровки используемого в опыте измерительного устройства.

Рис. 3 иллюстрирует экспериментальную проверку зависимостей $X(n)$, контролируемых датчиком потерь интенсивности ускоренного пучка, при минимальных рабочих напряжениях на ускоряющем резонаторе $U_1 = 11,5$ кВ, $U_2 = 9,9$ кВ. Величина T здесь уменьшена до 0,08 с. Экспериментальные точки хорошо согласуются с расчетными кривыми, построенными для напряжений, которые соответственно на 3 и 4,5% ниже измеренных при эксперименте.

В описываемых опытах не могли быть измерены наибольшие достигнутые времена τ , соответствующие $X \rightarrow 1$ (рис. 2), главным образом, из-за ограниченной точности измерения малых потерь. Для

режимов работы, иллюстрируемых рис. 3, при напряжении $U_1 = 11,5$ кВ модуляция n от 0,71 до 0,62 сопровождалась увеличением времени существования τ в 37 раз от 0,15 до 5,6 с.



Р и с. 3. Расчетные зависимости $X(n)$ при напряжениях на ускоряющем резонаторе $U_1 = 11,5$ кВ, $U_2 = 9,9$ кВ и экспериментальные точки (по измерениям с помощью датчика интенсивности потерь электронов) в сопоставимых режимах работы синхротрона

Экспериментальная реализация второго рассмотренного выше примера (с модуляцией показателя поля в диапазоне $n = 0,71 \div 0,51$) неизбежно потребует прохождения через резонансы бетатронных колебаний. Поэтому в экспериментах на пучке синхротрона ФИАН была также исследована, при пониженной энергии электронов, возможность прохождения без потерь ряда резонансов, находящихся в пределах описываемой рис. 1 области значений n . Резонансы при $n = 0,606$ и $0,611$ /3/ исследованы при энергии электронов $E \approx 300$ МэВ, резо-

нанси при $n = 0,5$ исследованы при $E = 185$ МэВ. Было показано, что потери пучка в области $n = 0,606 \div 0,611$, достигавшие $\sim 90\%$ при медленном прохождении этой области (при $dn/dt \sim 1,5$ с $^{-1}$), практически исчезали при легко достижимой скорости $dn/dt \sim 16$ с $^{-1}$. Аналогичный результат получен для области $n \sim 0,5$. Эти опыты подтверждают возможность реализации описанного метода в полном объеме кривых $X(n)$ рис. I.

В заключение авторы благодарят Г. С. Паденко за помощь в осуществлении отдельных измерений и В. Н. Канунникова за полезные обсуждения работы.

Поступила в редакцию
25 октября 1977 г.

Л и т е р а т у р а

1. Е. М. Мороз, *ЖЭТФ*, **33**, 1309 (1957).
2. M. Sands, *Nuovo Cimento*, **XV**, 599 (1960).
3. З. Л. Артемьева, Е. М. Мороз, К. Н. Шорин, А. С. Яров, Пятое всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 5 - 7 октября, 1976 г.), аннотации докладов. Москва - 1976 г., стр. 58, 59.