

ВЛИЯНИЕ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКИ УСКОРЯЮЩЕГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ УСТАНОВЛЕНИЯ И ПРЕДЕЛЬНЫЙ ТОК МИКРОТРОНА

А. В. Кольцов, А. В. Серов

Введение

В микротроне при достаточно больших ускоряемых токах электромагнитное поле, наводимое сгустками, приводит к изменению условий захвата электронов в режим ускорения. Исследованию влияния полей, возбуждаемых ускоряемым пучком, на работу микротрона посвящены работы [1—3]. В них учитывалось взаимодействие пучка и резонатора только на основной частоте, поскольку на этой частоте добротность резонатора и наведенное током напряжение максимальны. В работах [1, 2] рассматривались процессы установления средней фазы электронных сгустков, ускоряемых в микротроне, и переходные режимы системы пучок—резонатор. При этом учитывалось, что ускоряемый ток не только уменьшает амплитуду электромагнитного поля в резонаторе, но и изменяет фазу этого поля. Показано, что конечность времени формирования стационарных значений интенсивности и фазы пучка приводит к ограничению величины ускоренного тока.

Из-за большой величины пролетных отверстий и отверстий связи добротность резонатора на высших гармониках ниже, чем на основной гармонике, следовательно, ниже амплитуда наводимого напряжения. Однако действие наведенных высших гармоник на движение частиц может оказаться существенным в основном из-за возникающих поперечных сил. В работах [4—7] рассматривалось влияние моды E_{011} , возбужденной в резонаторе микротрона ускоренным током, на динамику частиц. Расчеты [4—6] и эксперименты [7] показали, что при соответствующих размерах резонатора эта мода наводится третьей гармоникой тока пучка. Возбуждение в резонаторе микротрона третьей гармоники (мода E_{011}) в дополнение к основной гармонике (мода E_{010}) приводит к увеличению коэффициента захвата, равного отношению ускоренного тока к току инжекции. Кроме того, уменьшается фазовая протяженность сгустков, что представляет интерес с точки зрения применения пучков в релятивистской электронике [8]. Однако до настоящего времени не были рассмотрены переходные процессы, учитывающие установление моды E_{011} . На практике эти процессы определяют режим работы микротрона и особенно важны при достаточно больших ускоренных токах. В настоящей работе рассмотрено установление режима ускорения в микротроне, в резонаторе которого ускоряемыми сгустками возбуждается третья гармоника ускоряющего поля. Показано, что влияние этой гармоники на процесс ускорения зависит от соотношения между мощностью ускоряемого пучка и мощностью, поступающей в резонатор от генератора.

Уравнения взаимодействия пучка с полем резонатора

Процесс установления ускоренного тока исследовался путем численного решения уравнений, описывающих возбуждение ускоряющих полей в резонаторе микротрона с учетом соотношения, определяющего зависимость коэффициента захвата от напряженности поля первой и третьей гармоник. При расчетах считали, что коэффициент захвата электронов в режим ускорения зависит только от амплитуд полей в резонаторе и не зависит от средней фазы микротронного пучка.

Уравнения, описывающие возбуждение в резонаторе первой и третьей гармоники ускоряющего поля, следуют из баланса мощностей и имеют вид

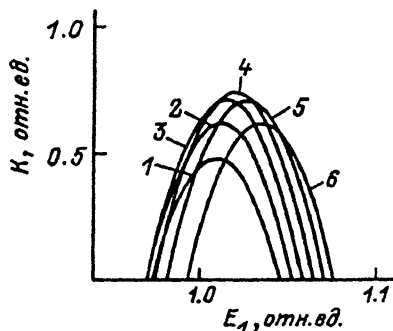


Рис. 1. Зависимость коэффициента захвата от напряженности первой гармоники ускоряющего поля E_1 для различных значений напряженности третьей гармоники ускоряющего поля E_3 .

E_3 : 1 — 0, 2 — 0.02 E_1 , 3 — 0.04 E_1 , 4 — 0.06 E_1 , 5 — 0.08 E_1 , 6 — 0.1 E_1 .

$$\dot{W}_1 = P_0 - P_{p1} - P_y - P_{и} - P_v, \quad (1)$$

$$\dot{W}_3 = P_v - P_{p3}, \quad (2)$$

где $W_i \sim E_i^2$ — энергия; E_i — напряженность поля; P_0 — мощность, поступающая от генератора; $P_{p1} = \omega W_1 / Q_1$; $P_{p3} = 3\omega W_3 / Q_3$ — мощность потерь в резонаторе; Q_i — добротность резонатора; $P_y \sim I_0 K$ — мощность ускоренных электронов; $P_{и} \sim I_0(1 - K)E_1$ — мощность электронов инжекции; $P_v \sim I_0 K$ — мощность возбуждения третьей гармоники; $I_0 \sim T^2 \cdot \exp(\alpha \sqrt{E_1} / T)$ — ток инжекции; K — коэффициент захвата; T — температура катода; индексы 1 и 3 соответствуют величинам, относящимся к первой и третьей гармоникам.

При выводе соотношения, описывающего зависимость коэффициента захвата от напряженности полей, использовались данные, приведенные в работе [5]. В этой работе в приближении заданного поля исследовалась динамика частиц в микротроне, в частности, вычислялся коэффициент захвата при заданных напряженностях поля. Значения, полученные в [5], хорошо аппроксимируются соотношением

$$K = -18[E_1 - (0.05E_3 + 2E_3^2 + 1.01)]^2 - 3.6(E_3 - 0.06)^2 + 0.037. \quad (3)$$

На рис. 1 приведена вычисленная по формуле (3) зависимость коэффициента захвата от напряженности поля первой гармоники E_1 в режимах ускорения, соответствующих различным значениям возбужденной пучком третьей гармоники поля E_3 . Видно, что коэффициент захвата отличен от нуля в достаточно узком диапазоне значений напряженности ускоряющего поля. Для всех режимов работы микротрона существуют верхнее и нижнее предельные значения E_1 , ограничивающие область резонансного ускорения электронов. Из рисунка следует, что рост амплитуды наведенной третьей гармоники вначале увеличивает коэффициент захвата, а затем приводит к его уменьшению.

При расчетах использовалась модель запаздывания рэлейного типа [2], в которой коэффициент захвата $K(t)$ и ток инжекции $I_0(t)$ в момент времени t определялись значением полей в более ранний момент времени $t - t_0$. Время запаздывания t_0 приблизительно равно времени пролета сгустка от первой до последней орбиты.

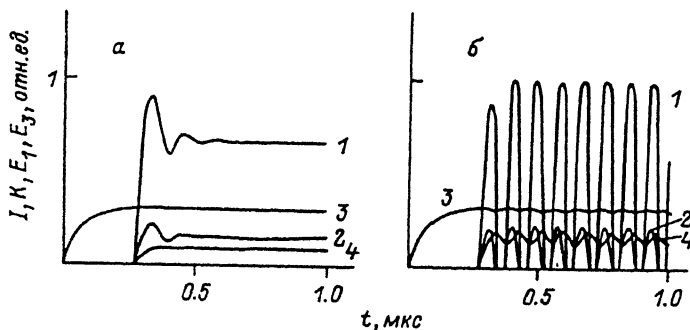


Рис. 2. Зависимость от времени ускоренного тока (1), коэффициента захвата (2), первой (3) и третьей (4) гармоник ускоряющего поля.

Q_3 : а — 400, б — 1600; $t_0 = 27$ нс, $Q_1 = 10^4$, $T = 2000$ °С, $P_0 = 1.0$ отн. ед.

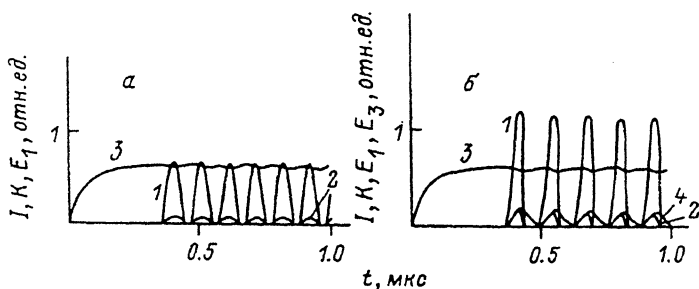


Рис. 3. Возбуждение автоколебаний в системе пучок—поле резонатора.

Q_3 : а — 0, б — 400; $P_0 = 1.15$ отн. ед.; значения t_0 и Q_1 — те же, что и на рис. 2; $T = 2200$ °С; 1—4 — то же, что и на рис. 2.

Результаты расчетов

Система уравнений с запаздывающим аргументом (1)—(3) решалась численно методом Рунге—Кутты. Рассматривался процесс установления ускоренного тока в микротроне при различных значениях мощности, подводимой к резонатору P_0 , и различных температурах катода T . Расчеты, выполненные при малой мощности ускоряемого пучка, показали, что наведенная мода E_{011} позволяет получить устойчивый режим ускорения при тех значениях подводимой к резонатору мощности, при которых ускорение только в поле основной моды E_{010} невозможно [9]. Наведенная мода увеличивает диапазон значений ускоряющего поля, при которых возможно ускорение, и увеличивает коэффициент захвата электронов и, следовательно, ускоренный ток.

При увеличении уровня мощности генератора, температуры катода и тока инжекции картина установления ускоренного тока существенно меняется. На рис. 2 приведена зависимость ускоренного тока, коэффициента захвата электронов, амплитуд первой и третьей гармоник от времени для различных значений добротности резонатора на третьей гармонике Q_3 . Полученные зависимости можно объяснить следующим образом. До появления ускоренного тока амплитуда поля в резонаторе экспоненциально нарастает с постоянной времени ω/Q_1 . При возникновении ускоренного тока начинает возбуждаться мода E_{011} , постоянная нарастания которой $3\omega/Q_3$. Пока амплитуда наведенной моды удовлетворяет условию $E_3 < 0.06E_1$, ее возбуждение приводит к росту коэффициента захвата, увеличению ускоренного тока и к уменьшению скорости роста амплитуды основной

моды E_{010} . Последнее вызвано расходом части мощности генератора на возбуждение наведенной моды. Если добротность Q_3 и ускоренный ток I таковы, что возможно возбуждение моды E_{011} с амплитудой $E_3 > 0.06E_1$, то через некоторое время от начала ускорения рост E_3 приводит к снижению коэффициента захвата и уменьшению ускоренного тока. При этом на фронте импульса возникают заглушающие колебания интенсивности ускоренного тока (рис. 2, а). При некоторых значениях Q_3 амплитуда наведенного напряжения увеличивается настолько, что коэффициент захвата падает до нуля и происходит срыв процесса ускорения. Заметим, что срыв происходит только из-за влияния паразитной моды E_{011} поскольку амплитуда первой гармоники удовлетворяет условию резонансного ускорения. После срыва ускорения амплитуда наведенной моды начинает уменьшаться и достигает величины, при которой вновь возможно ускорение. В результате таких процессов импульс тока теряет прямоугольную форму и представляет собой серию пиков (рис. 2, б).

Дальнейшее увеличение уровня мощности генератора и тока инжекции приводит к срыву системы пучок—поле резонатора в режим устойчивых автоколебаний и тогда, когда в резонаторе микротрона возбуждена только первая гармоника ускоряющего поля и нет наведенной моды E_{011} (рис. 3, а). Механизм срыва в этом случае иной. Ускорение прекращается из-за того, что наводимое пучком напряжение понижает амплитуду первой гармоники E_1 до величины, меньшей нижнего предельного значения резонансного ускоряющего поля. Этот автоколебательный режим возможен только при превышении ускоряемым током некоторого порогового значения [2]. Если при таком режиме работы в резонаторе микротрона возбуждается третья гармоника поля ($Q_3 \neq 0$), то происходит увеличение амплитуды ускоренного тока, достигаемого за время одного колебания интенсивности, и изменяется длительность импульса тока и интервал между импульсами (рис. 3, б).

Заключение

Как показали расчеты процессов установления ускоренного тока, возбуждение в резонаторе микротрона третьей гармоники ускоряющего поля (моды E_{011}) вызывает увеличение в полтора раза диапазона значений напряженности поля, при которых возможно резонансное ускорение частиц. При умеренных энергиях и ускоряемых токах (10—15 МэВ, 50—80 мА) это приводит к снижению требований на стабильность мощности, поступающей в резонатор, и температуры катода. При ускоряемых токах > 100 мА третья гармоника затрудняет выход микротрона на стационарный режим ускорения. Микротрон переходит в режим устойчивых автоколебаний, однако повышается ток, достигаемый в одном коротком импульсе. Варьируя величину добротности резонатора на третьей гармонике Q_3 , можно изменять длительность импульса тока и период автоколебаний.

Авторы благодарят В. Г. Куракина за полезные замечания и К. А. Беловинцева за обсуждение полученных результатов.

Список литературы

- [1] Косарев Е. Л. // Электроника больших мощностей. № 5. М.: Наука, 1968. С. 283—305.
- [2] Косарев Е. Л. // ЖТФ. 1972. Т. 42. Вып. 10. С. 2239—2247.
- [3] Карев А. И., Куракин В. Г. // Препринт ФИАН. № 174. М., 1978. 10 с.
- [4] Беловинцев К. А., Серов А. В. // Краткие сообщения по физике ФИАН. М., 1979. Вып. 3. С. 12—16.
- [5] Беловинцев К. А., Левонян С. В., Серов А. В. // Препринт ФИАН. № 4. М., 1979. 11 с.
- [6] Беловинцев К. А., Левонян С. В., Серов А. В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 4. С. 752—758.
- [7] Беловинцев К. А., Серов А. В. // Краткие сообщения по физике ФИАН. М., 1983. Вып. 9. С. 18—22.
- [8] Капица С. П., Мелехин В. Н. // Микротрон. М., Наука. 211 с.
- [9] Кольцов А. В., Серов А. В. // Краткие сообщения по физике ФИАН. М., 1991. Вып. 3. С. 11—14.