

О СТАБИЛИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ ПУЧКА В УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Ю. Д. Черноусов¹, И. В. Шеболаев

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск, Россия

Стабилизация энергии частиц в ускоряющей структуре стоячей волны достигается за счет задержки инжекции пучка и амплитудной модуляции входной сверхвысокочастотной (СВЧ) мощности в структуру при огибающей, имеющей вид последовательности из двух импульсов прямоугольной формы регулируемой амплитуды без задержки между ними и инжекции пучка в течение второго СВЧ-импульса.

Energy of the particles in the standing-waves accelerating structure is stabilized due to the delay of the beam injection and the amplitude modulation of the input microwave power into the structure with the envelope in the form of a sequence of two rectangular pulses of adjustable amplitude without any delay between them and the injection of the beam during the second microwave pulse.

PACS: 29.27.-a

ВВЕДЕНИЕ

В ускоряющих структурах бегущей и стоячей волн при импульсном сверхвысокочастотном (СВЧ) питании возникает переходный процесс, амплитуда ускоряющего напряжения зависит от времени, что приводит к увеличению энергетического разброса ускоряемых частиц [1–9]. Переходный процесс установления СВЧ-колебаний в ускоряющей структуре стоячей волны с учетом тока пучка и его влияние на энергетический разброс частиц обсуждался в ряде работ [1–3, 5–9]. Рассмотрение проводят исходя из принципа суперпозиции, в соответствии с которым полагают, что генератор и пучок независимо возбуждают в ускоряющей структуре электромагнитные поля, амплитудное значение каждого из которых зависит от времени. Суперпозиция этих полей в структуре дает суммарное поле, в котором происходит ускорение частиц. Ускоряющую структуру представляют в виде одиночного резонатора.

Амплитуду СВЧ-колебаний в ускоряющем резонаторе можно стабилизировать путем инжекции пучка с задержкой относительно начала СВЧ-импульса, возбуждающего резонатор [1–3, 5, 6]. Величину задержки момента инжекции выбирают такой, чтобы при заданном токе после включения пучка суммарная амплитуда СВЧ-колебаний в резонаторе, определяемая генератором и пучком, не зависела от времени. Тогда ускоряющее

¹E-mail: chern@catalysis.ru

напряжение, величина которого пропорциональна амплитуде СВЧ-колебаний, также не зависит от времени. Это позволяет формировать ускоренный пучок заряженных частиц с узким энергетическим спектром. При таком способе стабилизации амплитуды время задержки и ток пучка взаимно-однозначно связаны: чем меньше ток пучка, тем больше величина времени задержки, что ограничивает область применения метода.

Обсуждался метод стабилизации напряжения путем возбуждения ускоряющей структуры СВЧ-сигналом с модулированной амплитудой [4, 7–9]. Задача ставится таким образом: необходимо найти такую форму огибающей входного СВЧ-сигнала, при которой амплитуда колебаний в ускоряющей структуре с учетом тока пучка не зависит от времени. Предложенным методом [4, 7–9] задача решается лишь частично. Ниже приведено решение задачи стабилизации амплитуды ускоряющего напряжения в ускоряющей структуре стоячей волны методом модуляции входного СВЧ-сигнала при одновременной задержке инжекции, позволяющее получить ускоренный пучок заряженных частиц с узким энергетическим спектром в широком диапазоне амплитуды и длительности импульсов тока. С этой целью ускоряющий резонатор возбуждают модулированным СВЧ-импульсом, состоящим из последовательности двух СВЧ-импульсов без задержки между ними, причем каждый импульс имеет огибающую прямоугольной формы, регулируемые длительность и амплитуду. Инжекцию пучка проводят с задержкой относительно начала модулированного СВЧ-импульса, равной длительности первого СВЧ-импульса, длительность времени инжекции выбирают равной длительности второго СВЧ-импульса.

1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Для пояснения метода рассмотрим переходный процесс в системе при импульсном возбуждении резонатора СВЧ-сигналом с учетом нагрузки током ускоряемого пучка. Для упрощения рассмотрения будем считать, что ускоряемый пучок сгруппирован в короткие сгустки, не меняет свою скорость при прохождении резонатора (релятивистский случай), частота возбуждающего СВЧ-сигнала и частота следования сгустков совпадают, СВЧ-колебания, наводимые в резонаторе независимо генератором и пучком, находятся в противофазе. Тогда от комплексных амплитуд колебаний [5] можно перейти к реальным величинам и зависимость от времени амплитуды СВЧ-колебаний U в ускоряющем резонаторе, возбуждаемым импульсным СВЧ-сигналом и пучком, записать в виде

$$\tau \frac{dU}{dt} + U = U_G - U_B, \quad \tau = \frac{2Q_0}{\omega_0(1 + \beta)}, \quad (1)$$

где τ — время установления колебаний в ускоряющем резонаторе; U_G, U_B — амплитуды колебаний, возбуждаемых в ускоряющем резонаторе соответственно СВЧ-импульсом и пучком заряженных частиц при $t \rightarrow \infty$; Q_0 — собственная добротность резонатора; ω_0 — частота резонатора; β — коэффициент связи резонатора с подводящей линией.

При постоянных величинах U_G, U_B и одновременном включении генератора и инжекции пучка решение уравнения (1) $U(t)$ имеет простой вид:

$$U(t) = (U_G - U_B) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right].$$

Далее рассмотрим случай возбуждения ускоряющего резонатора в соответствии с предлагаемым методом импульсными СВЧ-сигналами разной амплитуды с огибающими прямоугольной формы с длительностью первого импульса T_1 и второго импульса T_2 при инжекции ускоряемого пучка заряженных частиц с задержкой (в течение второго СВЧ-импульса).

В течение первого СВЧ-импульса ускоряющий резонатор возбуждается только первым СВЧ-импульсом генератора, амплитуда СВЧ-колебаний возрастает. К моменту окончания первого СВЧ-импульса амплитуда СВЧ-колебаний $U(T_1)$ определяется соотношением

$$U(T_1) = U_{G1} \left[1 - \exp \left(-\frac{T_1}{\tau} \right) \right],$$

где U_{G1} — стационарное значение амплитуды колебаний в резонаторе при воздействии на резонатор только первого СВЧ-импульса при $T_1 \rightarrow \infty$.

В течение второго СВЧ-импульса длительностью T_2 СВЧ-колебания в ускоряющем резонаторе складываются из трех зависящих от времени компонент — спадающих СВЧ-колебаний после выключения первого СВЧ-импульса с амплитудой $U_{T1}(t)$:

$$U_{T1}(t) = U_{G1} \left[1 - \exp \left(-\frac{T_1}{\tau} \right) \right] \exp \left(-\frac{t - T_1}{\tau} \right), \quad t > T_1,$$

СВЧ-колебаний, возбуждаемых вторым СВЧ-импульсом, с амплитудой $U_G(t)$:

$$U_G(t) = U_{G2} \left[1 - \exp \left(-\frac{t - T_1}{\tau} \right) \right], \quad T_2 + T_1 \geq t \geq T_1,$$

где U_{G2} — стационарное значение ускоряющего напряжения при воздействии на резонатор только второго СВЧ-импульса при $t \rightarrow \infty$, и СВЧ-колебаний, возбуждаемых пучком заряженных частиц:

$$U_B(t) = U_B \left[1 - \exp \left(-\frac{t - T_1}{\tau} \right) \right], \quad T_2 + T_1 \geq t \geq T_1,$$

где U_B — стационарное значение амплитуды СВЧ-колебаний при воздействии на резонатор только пучка заряженных частиц при $t \rightarrow \infty$.

Амплитуда СВЧ-колебаний в ускоряющем резонаторе является суммой трех указанных амплитуд, зависящих от времени, поэтому также зависит от времени:

$$U(t) = U_{T1}(t) + U_G(t) - U_B(t) = (U_{G2} - U_B) + \left[U_{G1} \left(1 - \exp \left(-\frac{T_1}{\tau} \right) \right) - U_{G2} + U_B \right] \times \exp \left(-\frac{t - T_1}{\tau} \right), \dots, T_2 + T_1 \geq t \geq T_1. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что при заданных значениях U_{G1} , U_B , T_1 , τ варьированием U_{G2} во временном интервале $T_2 + T_1 \geq t \geq T_1$ можно добиться выполнения соотношения

$$U_{G1} \left(1 - \exp \left(-\frac{T_1}{\tau} \right) \right) - U_{G2} + U_B = 0. \quad (3)$$

В этом случае амплитуда СВЧ-колебаний в течение второго импульса, $T_2 + T_1 \geq t \geq T_1$, не зависит от времени и определяется соотношением

$$U(t) = (U_{G2} - U_B) = U_{G1} \left(1 - \exp\left(-\frac{T_1}{\tau}\right) \right). \quad (4)$$

Таким образом, при возбуждении ускоряющего резонатора последовательностью СВЧ-импульсов с огибающими прямоугольной формы варьированием амплитуды второго импульса генератора и, соответственно, величины U_{G2} можно выбрать такой режим возбуждения ускоряющего резонатора СВЧ-сигналом, при котором исключается зависимость амплитуды СВЧ-колебаний от времени, указанная амплитуда СВЧ-колебаний стабилизируется, что дает возможность получать ускоренный пучок заряженных частиц с узким энергетическим спектром. Ширина спектра в этом случае определяется только динамикой частиц при постоянной амплитуде ускоряющего напряжения. В соответствии с (3), (4) возможен независимый выбор момента инжекции пучка в ускоряющий резонатор T_1 и величины напряжения U_B , пропорционального току ускоряемого пучка.

2. МАКЕТНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

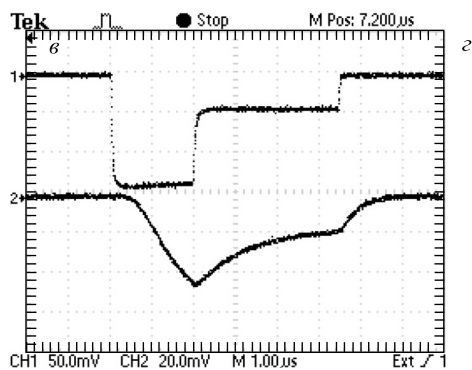
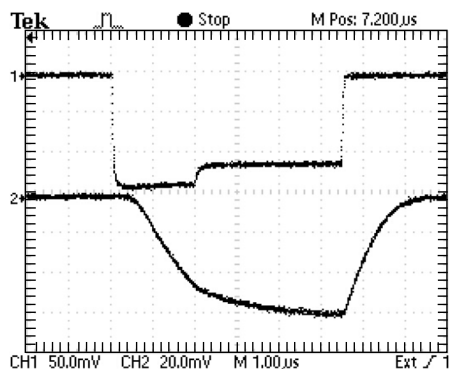
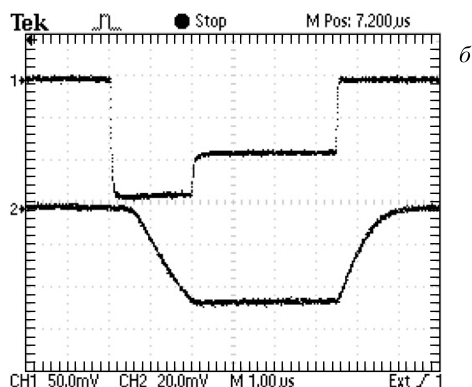
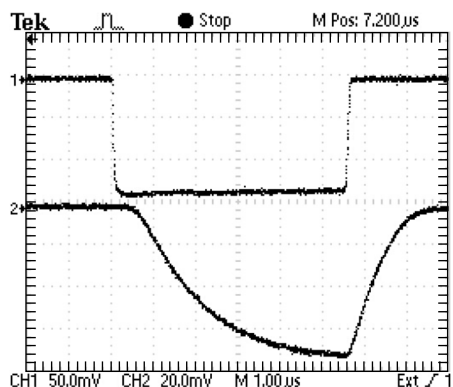
Экспериментальная проверка предложенного способа стабилизации энергии пучка ускорителя осуществлялась на макете, содержащем высокочастотный резонатор, подключенный к импульсному СВЧ-генератору. Значения параметров следующие: $Q_0 = 1,2 \cdot 10^4$, $\omega_0/2\pi = 2,45$ ГГц, $\beta \approx 0,1$, $\tau \approx 1,5 \cdot 10^{-6}$ с, $T_1 \approx 1,5 \cdot 10^{-6}$ с, $T_2 \approx 4 \cdot 10^{-6}$ с. Для упрощения измерений эксперимент проводился без пучка заряженных частиц, т.е. выбирался режим $U_B = 0$. Сущность метода при этом, однако, проверяется, поскольку варьированием амплитуды второго импульса достигается выполнение соотношения, которое следует из (3) при $U_B = 0$:

$$U_{G1} \left(1 - \exp\left(-\frac{T_1}{\tau}\right) \right) - U_{G2} = 0. \quad (5)$$

В этом случае ускоряющее напряжение также перестает зависеть от времени и в течение второго импульса определяется соотношением (4) при $U_B = 0$.

Резонатор возбуждался от генератора СВЧ-импульсом с огибающей прямоугольной формы или последовательностью СВЧ-импульсов без задержки между ними с огибающей прямоугольной формы каждого импульса. Во втором случае амплитуда первого импульса выбиралась и фиксировалась, амплитуда второго импульса варьировалась от нуля до значения амплитуды первого импульса. СВЧ-импульсы детектировались, и полученные сигналы подавались на осциллограф. Полученные осциллограммы приведены на рисунке. Линия 1 представляет форму огибающей падающего СВЧ-сигнала, линия 2 показывает форму огибающей СВЧ-сигнала с зонда из резонатора.

При подаче в резонатор СВЧ-импульса с огибающей прямоугольной формы (рис. а, линия 1) в резонаторе происходит процесс установления и спада колебаний (рис. а, линия 2). При подаче в резонатор модулированного СВЧ-импульса, состоящего из последовательности двух импульсов, каждый из которых имеет огибающую прямоугольной формы (рис. б, линия 1), в резонаторе в течение первого импульса колебания устанавливаются, а в течение второго импульса при выполнении соотношения (5), т.е. при амплитуде



второго импульса, равной некоторой расчетной (подбирается в процессе измерений), уровень запасенной энергии, а значит, и амплитуда колебаний не зависят от времени (рис. б, линия 2), что подтверждает предложенный метод стабилизации амплитуды колебаний в резонаторе макета и, следовательно, напряжения в ускоряющем резонаторе в реальном ускорителе стоячей волны. Если амплитуда второго импульса больше расчетной (рис. в, линия 1), то амплитуда колебаний в резонаторе возрастает (рис. в, линия 2), если меньше расчетной (рис. г, линия 1), то амплитуда колебаний в резонаторе в течение второго импульса падает (рис. г, линия 2).

ВЫВОДЫ

Приведенные расчеты и результаты эксперимента показывают, что возбуждение ускоряющего резонатора импульсным модулированным СВЧ-сигналом, состоящим из последовательности двух СВЧ-импульсов без задержки между ними, каждый из которых имеет огибающую прямоугольной формы, и инжекция пучка заряженных частиц в течение второго импульса СВЧ-генератора позволяют при заданном и фиксированном токе пучка варьированием амплитуды второго СВЧ-импульса установить такой режим возбуждения колебаний в резонаторе, при котором амплитуда колебаний и, следовательно, ускоряю-

щее напряжение в течение второго СВЧ-импульса не зависят от времени. Данный метод может быть использован для стабилизации амплитуды колебаний в резонаторе, формирования ускоренных пучков заряженных частиц с узким энергетическим спектром.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wilson P. B.* SLAC-PUB-2884. Rev. 1991.
2. *Wangler T. P.* RF Linear Accelerators. WILEY-VCH. 2008.
3. *Miller R. H.* SLAC-PUB-3935. 1986.
4. *Jones R. M. et al.* SLAC-PUB-9870. 2003.
5. *Викулов В. Ф., Заворотыло В. Н., Рузин В. В., Шилов В. К.* // ЖТФ. 1982. Т. 52, № 11. С. 2188–2191.
6. *Иванников В. И., Павлов В. М., Черноусов Ю. Д., Шеболаев И. В.* // ЖТФ. 2004. Т. 74, № 6. С. 134–136.
7. *Kashiwagi S. et al.* // Proc. of LINAC 1998. P. 91–93.
8. *Yokoyma Y. et al.* // Proc. of IPAC 2011. P. 1132–1134.
9. *Yokoyma Y. et al.* // Proc. of IPAC 2010. P. 4119–4121.