

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ СВЧ СИСТЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

А.Н. Ермаков^{1,2}, А.А. Гуня²

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, ²ООО Лаборатория электронных ускорителей МГУ

E-mail: a_ermak1978@mail.ru

Как правило, в системах СВЧ питания линейных ускорителей электронов применяется схема прямого возбуждения клистрона. Для обеспечения долговременной стабильности параметров ускорителя таких, как энергия и ток пучка, необходимо обеспечить максимальное отклонение высоковольтного питания клистрона от рабочего на уровне не хуже $\pm 0.05\%$. При этом дрейф температуры охлаждающей жидкости ускоряющей структуры должен быть не более $\pm 0.1\%$. Тем не менее реализация столь высоких требований не позволяет исключить переходной процесс, связанный с дрейфом резонансной частоты ускоряющей структуры. Данный эффект обусловлен обратимыми деформациями ускоряющих ячеек при вводе СВЧ мощности и нестабильностью температуры охлаждающей жидкости. Автоматическая подстройка частоты генератора (АПЧГ) на основе фазового детектора позволяет корректировать частоту задающего генератора СВЧ системы в соответствии с текущей резонансной частотой структуры. Следует отметить, что данный подход широко используется при создании систем СВЧ питания ускорителей [1].

Структурная схема предлагаемой АПЧГ СВЧ системы линейного ускорителя импульсного действия показана на рис. 1. Высокостабильный синтезатор НМС833 (2), управляемый через интерфейс SPI, формирует непрерывный сигнал мощностью 1 мВт. Усиление и модуляция данного сигнала происходит в тракте (3), который состоит из импульсного СВЧ предусилителя и многолучевого клистрона. Детальное устройство и работа тракта (3) выходит за пределы рассматриваемого отчета. С выхода с направленного ответвителя (4) через переменный аттенюатор (7) и вентиль (10) поступает на вход 0° балансного смесителя 11. Через фиксированный аттенюатор (8) и управляемый фазовращатель (9) и вентиль (17) сигнал с петли связи ускоряющей структуры (6) поступает на вход 3 дБ гибридного моста (11). Дифференциальный сигнал с выхода балансного смесителя (11) через коаксиальные гальванические развязки (12) поступает на детекторные головки (13). Контроллер системы АПЧГ (1) в зависимости от величины разностного низкочастотного сигнала на выходе схемы выборки хранения (14) устанавливает требуемую частоту сигнала СВЧ синтезатора (2).

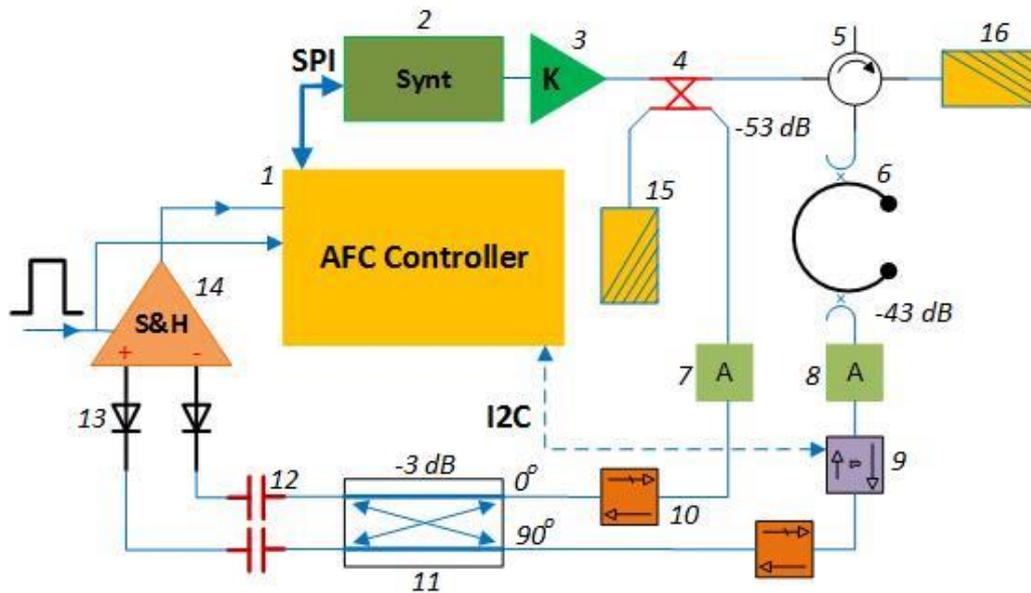


Рис. 1. Структурная схема АПЧГ. 1 – контроллер, 2 – синтезатор НМС833, 3 – усилительный тракт, 4 – волноводно-коаксиальный направленный ответвитель, 5 – циркулятор, 6 – ускоряющая структура, 7 – переменный аттенюатор, 8 – фиксированный аттенюатор, 9 – фазовращатель, 10 – коаксиальный вентиль, 11 – 3 дБ балансный смеситель, 12 – коаксиальная гальваническая развязка, 13 – детекторная головка, 14 – схема выборки-хранения, 15 – коаксиальная согласованная нагрузка, 16 – волноводная согласованная нагрузка.

Напряжение на бесконечно узком зазоре эквивалентного резонатора определяется выражением [2]:

$$V_c(t) = \frac{\cos \psi(t)}{1+\beta} \left\{ \sqrt{4\beta Z_e P_{kl} - [I_b Z_e \sin(\psi(t) - \varphi_b)]^2} - I_b Z_e \cos(\psi(t) - \varphi_b) \right\}, \quad (1)$$

где Z_e - эффективное шунтовое сопротивление ускоряющей структуры, $Z_e = \frac{V_c^2}{P_c}$, где P_c - импульсная мощность СВЧ потерь в стенках, β - коэффициент связи ускоряющей структуры с питающим волноводом, I_b - импульсный ток пучка, P_{kl} - мощность сигнала, поступающего от СВЧ источника, на вход ускоряющей структуры, ψ - угол расстройки, $\psi(t) = \arctan\left(-2Q_L \frac{f_s - f(t)}{f(t)}\right)$, Q_L - нагруженная добротность, f_s - частота СВЧ источника, f - резонансная частота ускоряющей структуры, φ_b - фаза пучка по отношению к V_c .

3 дБ гибридный мост [3] 11 (рис. 9) представляет собой восьмиполюсник, матрица передач которого имеет вид [2]:

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Связь между падающей и отраженной волнами можно найти из матричного уравнения:

$$B = S \times A, \quad (3)$$

где $A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix}$ – столбец входной (падающей) волны, $B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix}$ – столбец

выходной (отраженной) волны. Для наглядности на рис. 2 схематично показан 3 дБ гибридный мост с

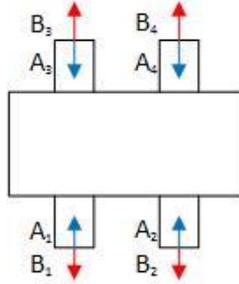


Рис. 2. Падающие и отраженные волны на входах 3 дБ гибридного моста.

В случае фазового детектора столбец входной волны будет иметь вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Поскольку к выходам 1 и 2 подключены согласованные детекторные головки отраженная волна здесь отсутствует $A_1 = A_2 = 0$. Подставляем (2) и (4) в (3) и находим компоненты столбца выходной волны:

$$B = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} A_3 + A_4 \\ A_3 - A_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Напряжение на выходе детекторной головки есть модуль соответствующей входной волны, которая является комплексной величиной. Если детекторная головка работает при малых сигналах, то справедлив квадратичный режим:

$$V_1 \sim |B_1|^2, V_2 \sim |B_2|^2 \quad (6)$$

где V_1 и V_2 – напряжения на выходах головок. Представим компоненты матрицы B в виде $B_i = B_{i0} e^{j(\omega t + \varphi_i)}$, где i – номер элемента матрицы B_{i0} – амплитуда, $\omega t + \varphi_i$ – фаза. Между падающими волнами с одинаковой частотой на входах 3 и 4 имеется сдвиг фаз θ , который в нашем случае обусловлен отличием резонансной частотой ускоряющей структуры от частоты сигнала на выходе синтезатора. Тогда (5) можно записать как

$$B = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} (A_{30} + A_{40} e^{j\theta}) e^{j\omega t} \\ (A_{30} - A_{40} e^{j\theta}) e^{j\omega t} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Подставляя компоненты матрицы (7) в (6) находим:

$$V_1 \sim \frac{1}{2} |(A_{30} + A_{40} e^{j\theta}) e^{j\omega t}|^2 = \frac{1}{2} |A_{30} + A_{40} e^{j\theta}|^2 \cdot |e^{j\omega t}|^2 = \frac{1}{2} |A_{30} + A_{40} \cos \theta + jA_{40} \sin \theta|^2 = \frac{1}{2} (A_{30} + A_{40} \cos \theta)^2 + \frac{1}{2} A_{40}^2 \sin^2 \theta = \frac{1}{2} A_{30}^2 + \frac{1}{2} A_{40}^2 + A_{30} A_{40} \cos \theta. \quad (8)$$

Аналогично

$$V_2 \sim \frac{1}{2} A_{30}^2 + \frac{1}{2} A_{40}^2 - A_{30} A_{40} \cos \theta. \quad (9)$$

После вычитания (9) из (8) получаем выражение для сигнала на выходе разностного усилителя и схемы выборки хранения

$$U_{AFC} = V_1 - V_2 = 2k_a A_{30} A_{40} \cos \theta, \quad (10)$$

Перепишем (10) в виде:

$$U_{AFC} = k \sqrt{P_{kl} P_c(t)} \sin \Delta \varphi, \quad (11)$$

где $\Delta \varphi = \psi(t)$ – разность фаз между сигналами с направленного ответвителя 4 и петли связи ускоряющей структуры 6, k – коэффициент, учитывающий ослабление петли связи, переходное ослабление направленного ответвителя 4, аттенуаторов 7 и 8.

Поведение напряжения на выходе схемы выборки-хранения в зависимости от разности частот показано на рис. 3. Коэффициент $k = 0,7 \cdot 10^{-6}$. Поскольку на практике сложно добиться абсолютно точного измерения «нуля» сигнала U_{AFC} , введем окно значений в окрестности $\Delta f = 0$ МГц. Тогда $U_m(t)$ – измеряемое значение U_{AFC} в момент времени t , U_h и U_l – верхняя и нижняя границы данного окна.

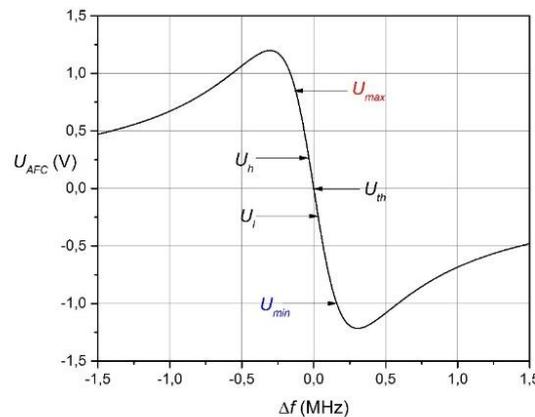


Рис. 3. Зависимость напряжения на выходе схемы выборки-хранения от разности частот СВЧ сигналов направленного ответвителя и петли связи ускоряющей структуры.

Перестройка частоты синтезатора 2 будем производить по закону [2]:

$$F_{AFC}(U_m(t_i)) = \begin{cases} f_g(t_{i+1}) = f_g(t_i) + \Delta f_{step} & \text{при } U_m(t_i) > U_h \\ f_g(t_{i+1}) = f_g(t_i) - \Delta f_{step} & \text{при } U_m(t_i) < U_l \end{cases}, \quad (12)$$

где Δf_s – величина шага перестройки синтезатора, $i = 1, 2, \dots$ – номер импульса СВЧ поля. Полагаем, что резонансная частота ускоряющей структуры со временем меняется согласно выражению:

$$f(t_{i+1}) = f_{final} + (f_{start} - f_{final}) e^{-t_i/\tau}, \quad (13)$$

где f_{start} – резонансная частота до подачи СВЧ мощности в момент времени $t = 0$, f_{final} – стационарная резонансная частота, τ – тепловая постоянная

ускоряющей структуры. Шаг по времени определим, как $\Delta t = \frac{1}{f_{rep}}$, где f_{rep} – частота следования импульсов СВЧ поля. Подставляя (12) и (13) в (1) находим окончательное выражение для напряжения на ускоряющем зазоре в момент времени t_i :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_g(t_1) = f_{g0}, t_1 = 0, \\ \psi(t_i) = \tan^{-1} \left(-2Q_L \frac{f_g(t_i) - f(t_i)}{f(t_i)} \right), \\ V_c(t_i) = \frac{\cos \psi(t_i)}{1 + \beta} \left\{ \sqrt{4\beta Z_e P_{kl} - [I_b Z_e \sin(\psi(t_i) - \varphi_b)]^2} - I_b Z_e \cos(\psi(t_i) - \varphi_b) \right\} \\ t_{i+1} = t_i + \Delta t \\ f_g(t_{i+1}) = F_{AFC}(U_m(t_i)). \end{array} \right. \quad (14)$$

Мощность дозы тормозного гамма-излучения на расстоянии 1 м от мишени имеет вид:

$$D_{1m} \left(\frac{\Gamma_p}{\text{мин}} \right) = 0,33 I (\text{мА}) E (\text{МэВ})^{\frac{3}{2}}, \quad (15)$$

Рис. 4 демонстрирует временную зависимость мощность дозы на расстоянии 1 м от тормозной мишени при различных постоянных значениях частоты синтезатора. Здесь наряду с параметрами из таблицы 1 заданы следующие величины: $f_{start} = 2857,0$ МГц, $f_{final} = 2856,8$ МГц и тепловая постоянная структуры $\tau = 20$ сек.

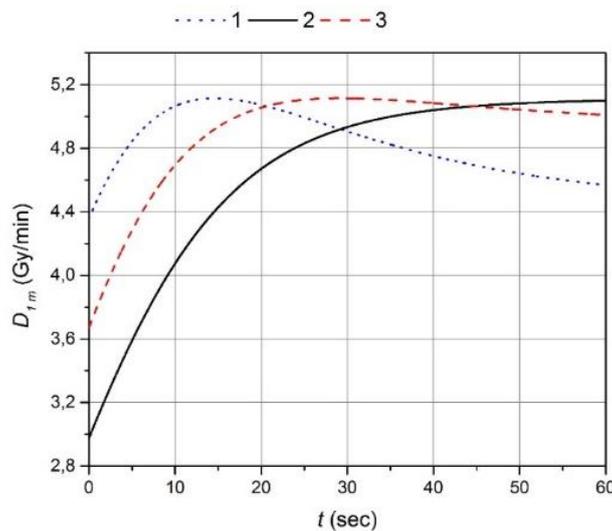


Рис. 4. Зависимость мощности дозы от времени. Частота синтезатора: 1 – 2856,9 МГц, 2 – 2856,8 МГц, 3 – 2856,85 МГц.

На поведение временной зависимости мощности дозы при включенной АПЧГ влияет ряд параметров таких, как чувствительность регулятора АПЧГ $p_{AFC} = \frac{dU_{AFC}}{df}$, начальная частота синтезатора f_{g0} , размер шага синтезатора Δf , размер окна АПЧГ $\Delta U_m = U_h - U_l$. В данный момент реализована система АПЧГ с чувствительностью регулятора $p_{AFC} \approx 2$ мВ/кГц в диапазоне отстройки от резонансной частоты ± 300 кГц. Это соответствует коэффициенту $k = 0,27 \cdot 10^{-6}$ в (11).

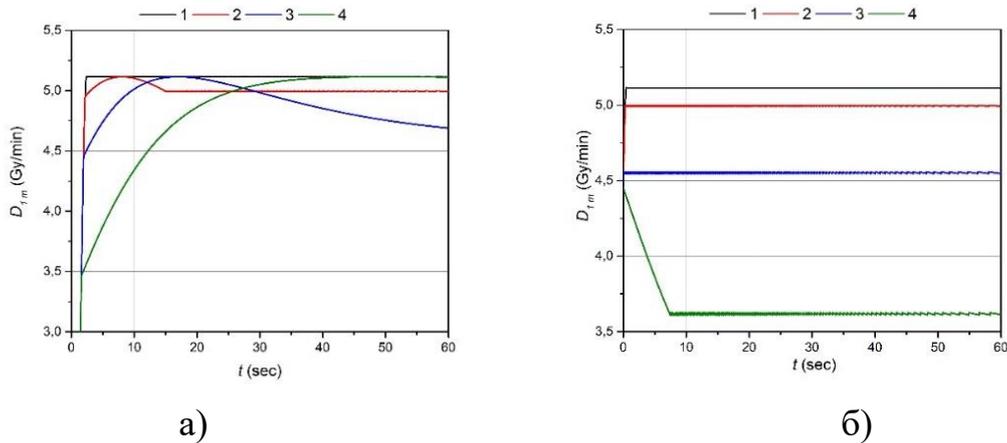


Рис. 5. Стабилизация во времени мощности дозы в зависимости от значения окна АПЧГ. 1 – 1 мВ, 2 – 100 мВ, 3 – 200 мВ, 4 – 300 мВ. а) $f_{g0} = 2856,6$ МГц, б) $f_{g0} = 2857,3$ МГц.

Влияние значения окна АПЧГ при начальной частоте синтезатора 2856,6 МГц показано на рис. 5(а). Что происходит при этом с частотой синтезатора, видно из рис. 6(а).

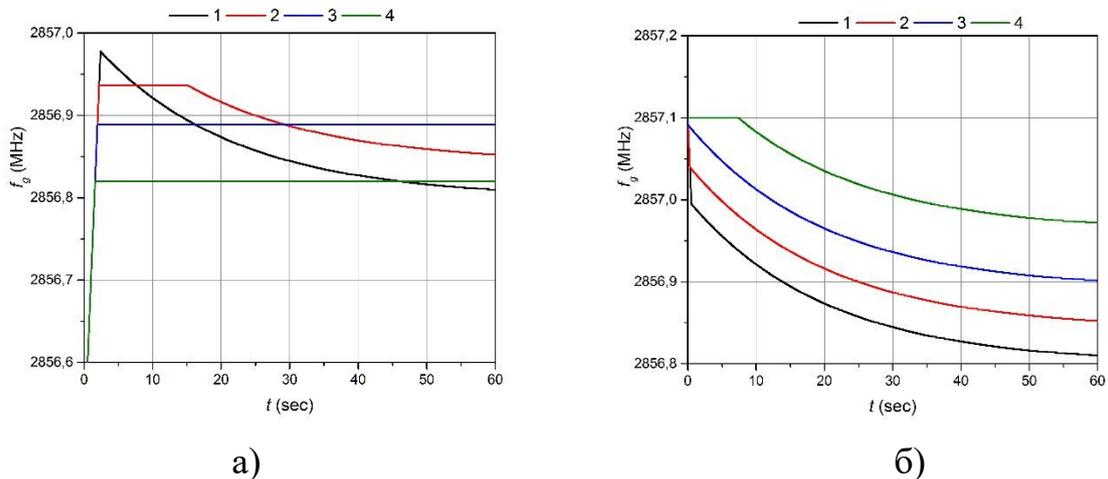


Рис. 6. Изменение частоты синтезатора при различных значениях окна АПЧГ. 1 – 1 мВ, 2 – 100 мВ, 3 – 200 мВ, 4 – 300 мВ. а) $f_{g0} = 2856,6$ МГц, б) $f_{g0} = 2857,3$ МГц.

Правильность выбора математической модели АПЧГ подтверждают эксперименты с действующими ускорителями. На рис. 7 показана зависимость количества отсчетов детекторной линейки тормозного гамма излучения, генерируемого тормозной мишенью, от времени.

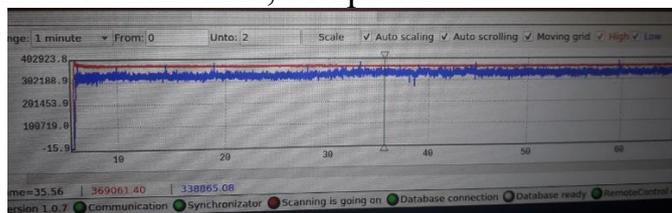


Рис. 7. Временная зависимость количества отсчетов детекторной линейки при включенной АПЧГ.

1. Development of a new concept automatic frequency controller for an ultrasmall C-band linear accelerator guide, Yuichiro Kamino, Med. Phys. 34 „8...”, August 2007
2. Perry B. Wilson HIGH ENERGY ELECTRON LINACS: APPLICATIONS TO STORAGE RING RF SYSTEMS AND LINEAR COLLIDER SLAC-PUB-2884 (Rev.) November 1991
3. Ж.Будурис, П.Шевеневье, Цепи сверхвысоких частот, Москва, «Советское Радио», 1979