

А.С. ВАРДАНЯН, Г.А. АМАТУНИ

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ КОНТРОЛЯ
ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ CANDLE**

Представлены результаты разработки системы СВЧ контроля для линейного ускорителя инжектора источника синхротронного излучения CANDLE. Разработанная методика основана на применении цифровой обратной связи, что позволяет обеспечить гибкость алгоритма контроля на базе частоты выборок 9 МГц. В работе применен метод СВЧ анализа [1], основанный на MATLAB SIMULINK, который позволяет моделировать и анализировать качество регулирования электрических полей в резонаторах для выбранной конфигурации линейного ускорителя. Результаты моделирования системы контроля линейного ускорителя проанализированы с точки зрения выходных параметров электронного пучка.

Ключевые слова: СВЧ система, линейный ускоритель, система контроля, амплитудно-фазовые характеристики.

Введение. Линейный ускоритель источника синхротронного излучения CANDLE [2] состоит из электронной пушки, напряжение на сетке которой смодулировано на частоте 500 МГц для получения наносекундных сгустков, группирователей сгустков на частотах 500 МГц и 3 ГГц и основной ускоряющей секции на бегущей волне с частотой 3 ГГц. Важнейшей особенностью системы является высокая степень синхронизации амплитудно-фазовых характеристик отдельных узлов для обеспечения пространственно-энергетических характеристик ускоренного пучка электронов. Это налагает жесткие требования на стабильность и контроль частоты, амплитуды и фазы возбуждаемых СВЧ электромагнитных полей.

1. Система управления СВЧ линейного ускорителя. Частота выборки СВЧ системы линейного ускорителя выбрана 9 МГц. Для измерения реальных и мнимых частей сигнала и разностного преобразования необходимо иметь промежуточную частоту 2,25 МГц. Если амплитуда и фаза локального генератора постоянны относительно основного генератора, то сигнал разностной частоты (2,25 МГц) будет содержать информацию об амплитуде и фазе СВЧ сигнала. Таким образом, получим четыре выборки в течение одного цикла, каждые две последовательные из которых могут быть представлены как реальная и мнимая части соответствующего вектора поля [3].

СВЧ сигнал от задающего генератора управляется векторным модулятором. В каждом волноводном канале должны быть установлены направленные ответвители и фазовращатели для измерения проходящих и отраженных волн и корректировки фазы. Каждый резонатор оборудован петлей связи ввода мощности и измерительной антенной или петлей. 500 МГц группирователь-резонатор имеет механический блок настройки частоты, который управляется шаговым двигателем. Для 3 ГГц группирователя выбран резонатор с низкой

2. Синхронизация. Частота выборки (9 МГц) должна быть синхронизирована по частоте с ВЧ сигналом и с сигналом локального генератора. Все частоты получены и подстроены по фазе к задающему генератору, частота которого была выбрана 500 МГц. Проектирование системы синхронизации, а также соответствующие методы распределения синхронизирующего сигнала находятся на стадии разработки и будут представлены в дальнейших публикациях.

[illegible]

419

Главные блоки и структура взаимосвязи между ними показаны на рис.1. Подсистемы СВЧ содержат блоки с файлами инициализации. Блок клистрона содержит в себе таблицу с измеренной нелинейной характеристикой клистрона, которую предполагается использовать в ускорителе. Резонаторы задаются набором дифференциальных уравнений с собственными характеристическими значениями импеданса R , резонансной частоты и добротности Q :

$$\begin{aligned} \dot{v}_i &= -\omega_{1/2} v_r - \Delta\omega v_i + \frac{R\omega_{RF}}{2Q} I_r, & \dot{v}_r &= \omega_{1/2} v_i + \Delta\omega v_r + \frac{R\omega_{RF}}{2Q} I_i, \\ \Delta\omega &= \omega_0 - \omega_{RF}, \end{aligned}$$

где I_r , I_i - реальные и мнимые части тока, а ω_{RF} - частота СВЧ системы.

Блок управления содержит в себе программы для обработки оцифрованных сигналов трех видов контроля: 1) основанный на самовозбуждении, 2) амплитудно-фазовой подстройки и 3) I/Q контроль (In-Phase Quadrature). Каждая подсистема имеет собственное время задержки, которое состоит из времени прохода пучка и времени, необходимого для пролета в следующую подсистему. В блоке "Control" используется "Quantizer" (непрерывно-дискретный преобразователь) для симулирования АЦП на частоте 9 МГц.

Перечисленные ниже возмущения и нарушения должны управляться и корректироваться системой контроля:

- флуктуация тока пучка, возбуждение высших мод и кильватерных полей;
- точность синхронизирующего сигнала, фазовые шумы от генератора;
- заполнение резонаторов, отраженные волны и изменения резонансной частоты резонаторов.

В дальнейшем разработанная программа для симуляции будет использована с целью диагностики в реальном масштабе времени амплитудно-фазовых характеристик, настройки подпрограмм и калибровки системы СВЧ.

На рис.2 показаны амплитуда и фаза поля, возбужденного в резонаторах стоячей бегущей волной. Как видно, напряженность и фаза остаются стабильными во время прохождения пучка (от 1 до 2 мкс). Отклонения составляют всего 0,1% напряженности и 1° фазы, что можно легко скорректировать и довести до 0,1° фазы с помощью предварительного контроля, подстраивая фазу при прохождении пучка.

На рис.2 ж, з в увеличенном масштабе показано изменение напряженности поля в ускорительной секции во время прохождения пучка. Как видно, отклонения напряженности от установленного значения составляют всего 0,5 % и остаются стабильными во время прохождения пучка: падение напряженности составляет 0,03 %, а смещение фазы – 0,4°.

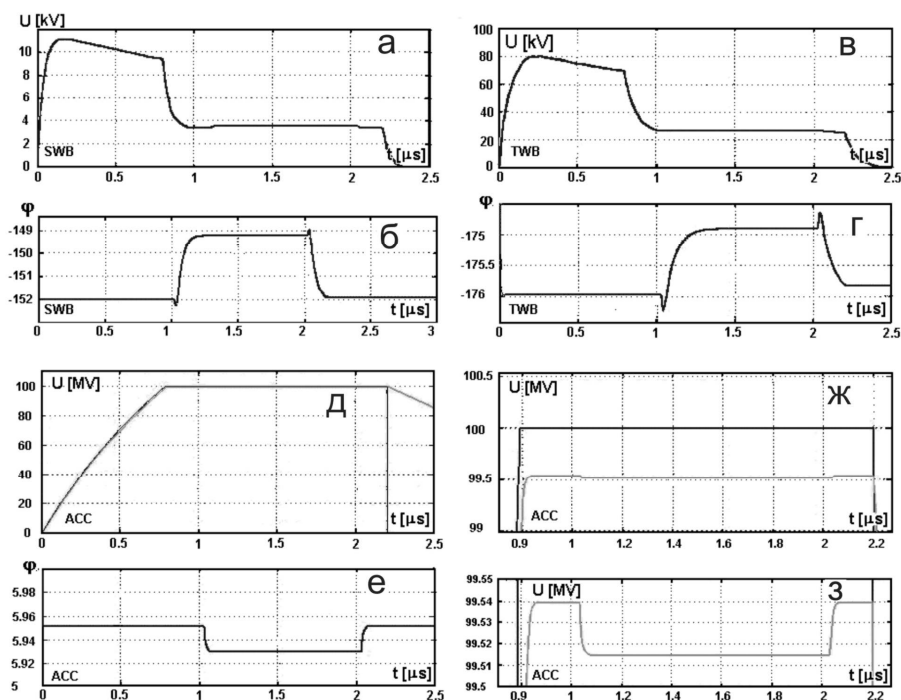


Рис.2. Амплитуда и фаза поля, возбужденного в резонаторах стоячей волны (а,б), бегущей волны (в,г) и в ускорительной секции (д,е)

4. Заключение. Результаты моделирования системы настройки пространственно-фазовых характеристик СВЧ полей показали, что выбранная конфигурация линейного ускорителя и системы СВЧ управления позволят обеспечить требуемые параметры электронного пучка на выходе из ускорителя [4]. Важным следствием проведенного исследования является стабильность параметров электронного пучка, обеспечиваемая в автономном режиме работы ускорителя на основе анализа данных и обратной связи с генераторами СВЧ мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Vardanyan A., Ayvazyan V., Simrock S.N.** An Analysis tool for RF Control for Superconducting cavities // EPAC'02. – Paris, 2002. - P.1673.
2. **CANDLE** Design Report. //ASLS-CANDLE R-001-02. – Armenia, 2002.
3. **Schilcher T.** Vector Sum Control of Pulsed Accelerated Fields in Lorentz Force Detuned Superconducting Cavities. – Hamburg, 1998.
4. **Grigoryan B., Tsakanov V., Vardanyan A.** The Design and Simulation Studies of the Pre-injector for CANDLE Light Source// EPAC'02. – Paris, 2002. - P.1765.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 03.03.2005.

Ա.Ս. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Գ.Ա. ԱՄԱՏՈՒՆԻ

CANDLE -ի ԳԾԱՑԻՆ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑՉԻ ԳԲՀ ՂԵԿԱՎԱՐՄԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ ԵՎ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Ներկայացված է CANDLE սինքրոտրոն ճառագայթման աղբյուրի ինժեկտոր հանդիսացող գծային արագացուցչի ԳԲՀ ղեկավարման համակարգի նախագիծը: Գծային արագացուցիչը բաղկացած է էլեկտրոնային թնդանոթից, որի ղեկավարման ցանցը մոդուլացված է 500 ՄՀց հաճախությամբ՝ ստանալու նանովայրկյանանոց թանձրուկների փունջ, 500 ՄՀց և 3 ԳՀց հաճախությամբ խմբավորիչ ռեզոնատորներից և 6 մետրանոց հիմնական արագացնող հատվածից: Համակարգի կարևորագույն առանձնահատկությունը առանձին ենթահամակարգերի ամպլիտուդափուլային բնութագրերի սինքրոնացման բարձր աստիճանն է, որը կապահովի արագացվող էլեկտրոնային փնջի տարածական և էներգետիկ բնութագրերը: Այս հանգամանքը խիստ պահանջներ է ներկայացնում գրգռված ԳԲՀ էլեկտրամագնիսական դաշտերի հաճախությանը, ամպլիտուդի և փուլի կայունությանն ու ղեկավարմանը: Մշակված մեթոդը հիմնված է թվային հետադարձ կապի կիրառման վրա, որը ճկուն ղեկավարման նախադրյալ: Ազդանշանի դիսկրետացման համար ընտրված է 9 ՄՀց հաճախությունը:

Օգտագործվել է ԳԲՀ համակարգի անալիզի համար մշակված մեթոդը, որը հիմնված է MATLAB SIMULINK-ի վրա և թույլ է տալիս մոդելավորել և ուսումնասիրել տվյալ գծային արագացուցչի ռեզոնատորներում դաշտի կարգավորման որակը: Բերված են նաև մոդելավորման որոշ արդյունքներ:

Առանցքային բաներ. ԳԲՀ համակարգ, գծային արագացուցիչ, ղեկավարման համակարգ, ամպլիտուդ-ֆազային բնութագրիչներ:

A.S. VARDANYAN, G. A. AMATUNI

DESIGN AND SIMULATION OF RF CONTROL SYSTEM FOR CANDLE LINAC

The design and philosophy of the control system for 500 MHz and 3 GHz RF system of CANDLE linac are presented. The linac includes an electron gun that is modulated by 500 MHz generator to produce 1 ns electron bunches, 500 MHz and 3 GHz bunchers, pre-accelerating cavity and the main accelerating section at 3 GHz. An important feature of the presented control system is high level synchronisation of amplitude-phase characteristics of sub-systems that provide the required energy-space characteristics of the accelerated beam. This puts strict requirements on the stabilization of RF frequency, amplitude and phase. A digital feedback system has been adopted to provide flexibility in the control algorithms. The main features are the sampling rate of 9 MHz for the cavity signals and digital I/Q detection. The design was performed using the RF analysis tool based on MATLAB SIMULINK which allows the simulation and analyzes the field regulation quality. The simulation results for CANDLE Linac RF system based on the output parameters of electron beam are given.

Keywords: RF system, linear accelerator, control system, amplitude-phase characteristics.