

СТАБИЛИЗАЦИЯ АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ КЛИСТРОНА СИСТЕМЫ СВЧ-ПИТАНИЯ ЛУЭ С ПОМОЩЬЮ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, Д.Л. Степин, И.В. Ходак
Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”,
Харьков, Украина
E-mail: khiv@kipt.kharkov.ua

Для проведения ядерно-физических экспериментов на линейном ускорителе электронов ЛУЭ-40 требуется долговременная нестабильность средней энергии электронов лучше, чем $\pm 0,5\%$. Анализ факторов нестабильности показал, что одной из причин является нестабильность тока клистрона системы СВЧ-питания ускорителя. Оценки показали, что относительное изменение энергии электронов практически линейно зависит от относительного изменения тока клистрона. Это значит, что стабильность тока клистрона также должна поддерживаться в пределах $\pm 0,5\%$. В работе предложен и реализован метод поддержания стабильности тока клистрона путем автоматического регулирования его анодного напряжения. Реализация метода основана на введении цепи обратной связи с микроконтроллерным регулирующим элементом, содержащим ПИД-закон регулирования. Анодное напряжение клистрона измеряется с помощью разработанного АЦП двойного интегрирования, позволяющего измерять напряжение с точностью $\pm 0,05\%$.

ВВЕДЕНИЕ

Ядерно-физические исследования с использованием линейного ускорителя электронов, в частности получение количественных экспериментальных данных о сечениях фотоядерных реакций для разных изотопов, предъявляют повышенные требования к энергетическим и пространственным характеристикам пучка. В первую очередь это касается поддержания долговременной нестабильности средней энергии электронов на уровне $\pm 0,5\%$.

В процессе эксплуатации ускорителя ЛУЭ-40 [1] были найдены основные факторы нестабильности характеристик пучка: высоковольтное напряжение питания источника электронов, мощность генератора возбуждения клистрона и высокочастотная мощность клистрона. Основные системы ускорителя питаются от стабилизатора напряжения, обеспечивающего стабильность $\pm 2\%$. Опыт показал, что этого недостаточно для проведения ядерно-физических исследований, требующих высокостабильных параметров пучка.

Для стабилизации мощности клистрона системы СВЧ-питания ускорителя ЛУЭ-40 нами предложено стабилизировать анодное напряжение клистрона. С этой целью нами разработана система стабилизации анодного напряжения на основе микроконтроллерной системы регулирования. Описание системы и результаты ее тестовых испытаний приводятся ниже.

1. ЗАВИСИМОСТЬ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ ОТ СВЧ-МОЩНОСТИ

В ускорителе ЛУЭ-40 используются секции типа «Харков-85», которые по своей структуре являются кусочно-однородными [2]. Для оценки влияния стабильности СВЧ-питания на стабильность энергии электронов на выходе секции с бегущей волной воспользуемся методом диффузии СВЧ-мощности (также известном как метод баланса энергии, см., напр., [3], [4])

$$\frac{dP(z)}{dz} = -2\alpha(z)P(z) - IE_b(z), \quad (1.1)$$

где $P(z)$ – поток мощности вдоль секции; I – ток пучка, усредненный за период ускоряющего поля; E_b – поле, наводимое сгустками электронов в секции. Этот подход справедлив в случае ультракоротких сгустков релятивистских электронов. Поток мощности связан с осевым электрическим полем следующей зависимостью:

$$P(z) = E^2(z)/R_s(z), \quad (1.2)$$

где $R_s(z)$ – последовательное сопротивление вдоль оси.

Подставляя (1.2) в (1.1) и решая полученное равенство отдельно для поля, наведенного пучком, и поля $E_g(z)$, возбужденного сторонним генератором, можно найти суммарное поле, действующее на электроны $E_{tot}(z)$ в виде:

$$E_{tot}(z) = E_g(z) \cos \varphi(z) - E_b(z), \quad (1.3)$$

где $\varphi(z)$ – разность фаз между полями. Энергия W частиц с зарядом e находится интегрированием полного поля вдоль секции:

$$W = e \int_0^L E_{tot} dz. \quad (1.4)$$

Можно показать, что для секции «Харков-85» выражение (1.4) для случая, когда $\cos \varphi(z)=1$ (ускорение на гребне волны) сводится к выражению:

$$W = 13,4\sqrt{P} - 65,6I, \quad (1.5)$$

где P – мощность СВЧ-питания секции.

При типовых значениях тока пучка и мощности СВЧ-питания секции 16 МВт и 60 мА соответственно вклад токовой нагрузки не превышает 10% (см. (1.5)), которым можно пренебречь. Тогда

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{2} \frac{\Delta P}{P}. \quad (1.6)$$

Мощность СВЧ-питания можно представить в виде $P = \eta U I_k$, где U и I_k соответственно напряжение и ток питания клистрона, а коэффициент η учитывает коэффициент полезного действия (КПД) и затухание мощности в волноводном тракте между клистроном и секцией. Опыт эксплуатации клистронов КИУ-12, используемых в ускорителе как источник ВЧ-мощности, показал, что КПД является практически постоянным в широком диапазоне изменения

высоковольтного питания. Для нормально функционирующего катода клистрона ток подчиняется закону «3/2»:

$$I_k = \mu U^{3/2}, \quad (1.7)$$

где μ – первеанс источника электронов клистрона. Тогда $P = \eta \mu^{-2/3} I_k^{5/3}$ и

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{5}{6} \frac{\Delta I_k}{I_k}. \quad (1.8)$$

Таким образом, чтобы поддерживать энергию электронов пучка постоянной с высокой точностью, нужно практически с такой же высокой точностью поддерживать постоянным ток клистрона.

2. СТАБИЛИЗАЦИЯ АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ КЛИСТРОНА

В модуляторах клистронов ускорителя ЛУЭ-40 применяется линейная схема, в которой для создания высоковольтных импульсов используется формирующая линия, которая разряжается с помощью тиратрона на импульсный трансформатор. Формирующая линия заряжается от высоковольтного источника питания постоянного тока с помощью резонансного контура, состоящего из ёмкости линии и индуктивности зарядного дросселя. Напряжение на выходе выпрямителя может достигать 50 кВ, при номинальном значении 40 кВ. При резонансном заряде напряжение на линии может превышать напряжение выпрямителя в 1,8 раза. Напряжение на выходе выпрямителя регулируется с помощью трехфазного трансформатора РТТ-25/0,5, регулируемого по первичной обмотке высоковольтного трансформатора источника питания. РТТ-25/0,5 регулирует напряжения от 0 до 380 В.

В последнее время для непосредственного заряда формирующих линий модуляторов применяются так называемые зарядные устройства с постоянным зарядным током, которые выпускаются коммерческими фирмами (см., например, [5]). Сейчас на рынке доступны такие устройства с напряжением 50 кВ, стабильностью 0,2 %.

Наиболее радикальным решением проблемы стабильности высоковольтного питания клистронов была бы замена резонансной схемы заряда линии на такое устройство. Отметим, что стабильность напряжения на линии 0,2 % поддерживалась бы от импульса к импульсу, потому что такие приборы выполняются на базе инверторов с периодом преобразования, намного меньшим периода повторения импульсов модулятора, что дает возможность компенсировать быструю нестабильность в сети питания. Но это потребовало бы значительных материальных затрат на изменение конструкции модуляторов клистронов, чтобы снизить напряжение на линии (применение двойной линии, или увеличение коэффициента трансформации импульсного трансформатора). Такая реконструкция может быть осуществлена только в рамках отдельной научно-исследовательской работы.

Для улучшения работы систем стабилизации мощности клистронов линейного ускорителя-инжектора в накопительном кольце Spring-8 [6] применяется стабилизация напряжения на выходе индукционных регуляторов, которые, в некотором

смысле, являются аналогами трансформаторов РТТ-25/0,5. Потому мы решили применить такой же принцип для разработки системы стабилизации анодного напряжения клистронов ускорителя ЛУЭ-40.

Охарактеризуем систему стабилизации в нескольких словах, а также приведем некоторые начальные данные для разработки. Регулируемым элементом является трансформатор РТТ-25/0,5, регулятором – микропроцессорное устройство, которое включает в себя высокоточный аналого-цифровой преобразователь. Сигнал обратной связи берется из устройства, которое измеряет средний ток клистрона на базе шунта класса 0,1 %. Величина сигнала шунта составляет 200 мВ. Для конкретности принимаем, что сигнал среднего тока клистрона пропорционален высокому напряжению выпрямителя для заряда формирующей линии.

Стандартный РТТ-25/0,5 для дистанционного управления оборудован асинхронным электромотором мощностью 270 Вт, который делает 1400 об./мин. Электромотор тратит на смену напряжения трансформатора от 0 до 380 В приблизительно одну минуту. Примем 380 В за 100 %. Тогда для оценок будем считать, что его вал делает 1400 оборотов, чтобы изменить напряжение на 100 %, или на 0,07 % за один оборот. Очевидно, что применять такой двигатель для точной регулировки напряжения нецелесообразно. Поэтому нами был использован шаговый двигатель со статическим усилием на валу 1,6 Н/м. Такой двигатель может заменить стандартный двигатель РТТ-25/0,5 при скорости вращения вала до 5 об./с, или 300 об./мин. Таким образом, максимальная скорость регулирования составляет 0,35 % за секунду. За один шаг вал шагового двигателя поворачивается на 1,8°, то есть один оборот составляет 200 шагов. Как видно, дискретность регулирования является достаточной, поэтому при регулировании двигатель будет делать значительную часть оборотов. Принимая, что стабильность сети на входе в трансформатор составляет ± 2 % (питание от стабилизатора), а мы можем компенсировать не больше, чем 0,35 % за секунду, то постоянная времени системы регулирования составляет не менее 7 с.

Рассмотрим основные компоненты системы стабилизации анодного напряжения клистрона.

3. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Система автоматического регулирования построена по типичной схеме с замкнутым циклом, регулирующим элементом в которой является программируемый микроконтроллер [7] (элемент УК на Рис.1).

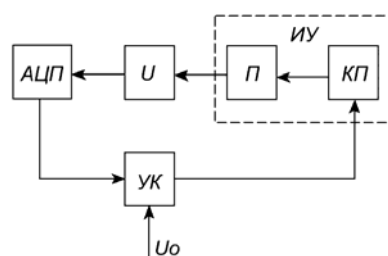


Рис.1. Блок-схема системы автоматического регулирования

Применение микроконтроллера позволяет создать автономную систему регулирования начального уровня, которую можно в дальнейшем интегрировать в общую систему управления ускорителем.

На микроконтроллер поступают сигналы, соответствующие устанавливаемому напряжению U_0 и анодному напряжению U , измеренному с помощью АЦП. В микроконтроллере вычисляется сигнал ошибки, который поступает на исполнительное устройство ИУ, регулирующее анодное напряжение клистрона и состоящее из привода шагового двигателя M и контроллера привода КП (см. Рис.1).

3.1. ИСПОЛНИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

В реализованном исполнительном устройстве подвижные обмотки трансформатора РТТ-25/0,5 перемещаются с помощью четырехфазного шагового двигателя M марки ДШР-56 (Рис.2).

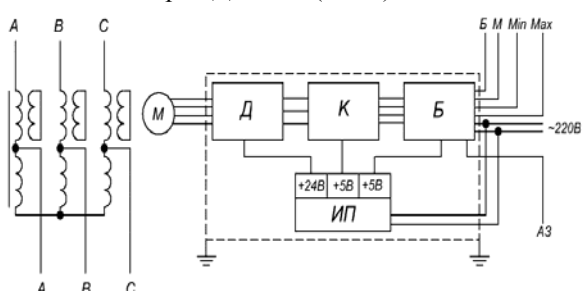


Рис.2. Блок-схема исполнительного привода: А, В, С – трехфазный автотрансформатор; М – шаговый двигатель; Д – драйвер двигателя; К – контроллер; Б – буферные элементы; ИП – источник питания

Работу двигателя обеспечивает штатный драйвер Д, управляемый сигналами, поступающими из контроллера двигателя К. Контроллер выполнен на базе микроконтроллера среднего семейства компании MICROCHIP PIC16F628A [8]. Управляющая программа микроконтроллера формирует сигналы для драйвера, анализируя управляющие команды: Б – увеличение напряжения, М – уменьшение напряжения, АЗ – автоматическое уменьшение напряжения, которые поступают на исполнительное устройство из штатной системы управления блокировками и сигнализацией (УБС) ускорителя. Сигналы Min, Max, поступающие с кнопок конечного положения подвижных обмоток автотрансформатора, соответствуют максимальному и минимальному значениям напряжения.

На Рис.3 приведено фото реализованного исполнительного привода, смонтированного на корпусе трансформатора РТТ-25/0,5.

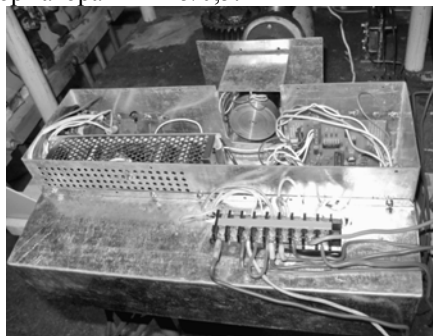


Рис.3. Исполнительное устройство

3.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ

Одним из факторов точности регулирования анодного напряжения U и поддержки его в допустимых границах U_0 есть точность, с которой напряжение U будет измерено с помощью АЦП. Для цифровых систем управления, наиболее приемлемыми являются АЦП с частотными и время-импульсными исходными сигналами, поскольку эти сигналы достаточно легко преобразуются в цифровой код. Наибольшими потенциальными возможностями среди АЦП подобного типа обладают интегрирующие преобразователи “напряжение-время”, основанные на методе двойного (двухтактного) интегрирования. Полное описание данного метода можно найти, например, в [9].

Коротко следует отметить, что название метода характеризует принцип измерения напряжения на протяжении двух тактов времени интегрирования (Рис.4).

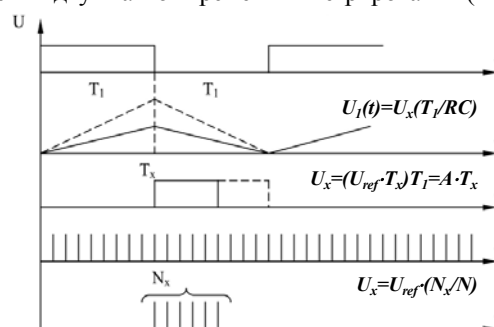


Рис.4. Основные зависимости метода двойного интегрирования

В первом такте T_1 интегрируется измеряемый сигнал U_x и результат $U_1(t)$ пропорционален измеряемому сигналу: $U_1(t) = U_x \cdot (t/RC)$. Во втором такте T_x интегрируется опорное напряжение обратной полярности. Длительность второго такта прямо пропорциональна величине измеряемого сигнала U_x и по окончании времени T_x получаем, что $U_x = (U_{ref} \cdot T_x) / T_1 = A \cdot T_x$. Выражая времена T_1 и T_x произведением количества периодов тактовых импульсов N и N_x соответственно на постоянную времени интегрирования RC , получаем, что измеряемое напряжение, не зависящее от RC и частоты следования тактовых импульсов:

$$U_x = U_{ref} \cdot (N_x / N).$$

Следует отметить, что если период интегрирования ($T_1 + T_x$) равен одному или нескольким периодам сигнала шума, то происходит ослабление шумового сигнала, так как интеграл по времени по целому числу периодов сигнала равен нулю. Следствием этого АЦП данного типа имеют повышенную помехоустойчивость, что позволяет достичь погрешности измерения в пределах 0,02...0,005 %.

В разработанной системе автоматического регулирования анодного напряжения клистрона использована микросхема АЦП двойного интегрирования компании MICROCHIP TC534 [10] (Рис.5).

В микросхему интегрирован 17-разрядный АЦП, имеющий систематическую погрешность измерения 0,012 %, генератор тактовых импульсов и SPI интерфейс передачи цифрового кода.

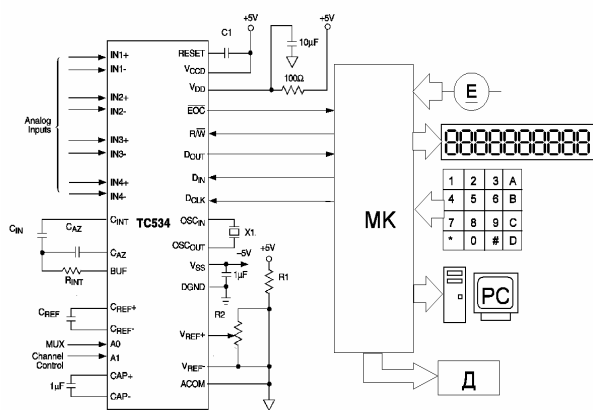


Рис.5. Блок-схема измерительного канала

Цифровой код передается в компьютер с помощью дополнительного микроконтроллера (МК на Рис.5) посредством UART-интерфейса. Для подавления сетевых наводок времязадающие элементы интегрирующей цепочки АЦП (C_{IN} , R_{INT} , C_{AZ} , C_{REF} на Рис.5) рассчитаны так, чтобы период интегрирования был кратен частоте питающей сети 50 Гц.

Законченный блок измерительного канала имеет индикацию величины измеряемого сигнала и собственную клавиатуру для установки заданного значения анодного напряжения. Собственная относительная погрешность измерительного канала тестировалась путем измерения напряжения гальванического элемента, и по результатам тестов эта величина составила 0,027 %.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Изготовленная система стабилизации была внедрена как цепь обратной связи в схему регулирования анодного напряжения клистрона. Проверка работы системы на выполнение условия поддержания стабильности анодного напряжения в пределах $\pm 0,5$ % проводилась на основе статистического анализа значений напряжения, записываемых в память компьютера с частотой одно измерение в секунду.

При всех работающих системах ускорителя было измерено напряжение, пропорциональное среднему току клистрона при отключенной системе стабилизации. При этом в отсутствие вынужденных манипуляций с анодным напряжением, проводимых оператором ускорителя, его величина определяется питающей сетью. Минимальное относительное среднеквадратичное отклонение этого напряжения за 6 минут составило 0,11 % (соответствует штриховой области на Рис.6).

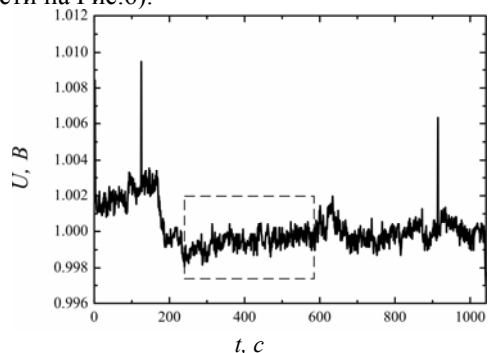


Рис.6. Напряжение, пропорциональное среднему току клистрона, при отключенной стабилизации ISSN 1562-6016. БАИТ. 2012. №4(80)

При всех работающих системах ускорителя и включенной системе стабилизации относительное среднеквадратичное отклонение напряжения с измерительного шунта системы от опорной величины составило 0,31 % примерно за один час (соответствует штриховой области 2 на Рис.7). Области 1 и 3 соответствуют отключенному состоянию системы стабилизации, и среднеквадратическое отклонение напряжения составило для них 0,45 и 0,85 % соответственно. Как видно из Рис.7 основной вклад в ошибку регулирования дают быстрые колебания напряжения, а не медленные, что характерно при выключенной системе стабилизации (см. Рис.6 и Рис.7 области 1 и 3). Это, по-видимому, связано с наличием «транспортной задержки», вызванной наличием в штатной цепи регулирования анодного напряжения релейных элементов, время срабатывания которых сравнимо с периодом измерения АЦП.

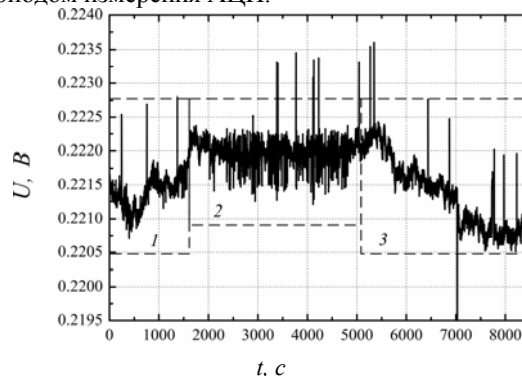


Рис.7. Напряжение, пропорциональное среднему току клистрона, при отключенной и включенной стабилизации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана и введена в эксплуатацию система стабилизации анодного напряжения клистрона системы ВЧ-питания ЛУЭ-40. Измерительный канал системы имеет собственную относительную погрешность измерения 0,027 %. Система поддерживает заданную величину напряжения с точностью 0,3 %, что позволяет поддерживать энергию электронов на выходе ускорителя с точностью $\approx 0,25$ %. Полученные значения согласуются с требованиями, предъявленными для проведения ядерно-физических исследований на ускорителе ЛУЭ-40.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта НАН Украины № X9-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Н.И. Айзацкий, В.И. Белоглазов, В.П. Божко и др. Ядерно-физический комплекс на основе линейного ускорителя электронов с энергией до 100 МэВ // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»* (53). 2010, №2, с.18-22.
2. О.А. Вальднер, А.Н. Диденко, А.В. Шальнов. *Ускоряющие волноводы*. М.: «Атомиздат», 1973, с.216.
3. Y. Thiery, J. Gao, J. Le Duff. Design Studies for a High Current Bunching System for CLIC Test Facility (CTF3) Drive Beam // *Proc. of the XX Interna-*

- tional Linac Conference LINAC2000*, Monterey (California). 2000, p.95-97.
4. E.Z. Biller, A.N. Dovbnya, V.A. Kushnir, et al. Beam Current Enhancement in Kharkov Electron Linac // *Part. Accel.* 27. 1990, p.119-124.
 5. M. Gu, Z.H. Chen, L.X. Fu. A High stability modulator for the SDUV-FEL linac // *Proc. of APAC 2004*. Gyeongju (Korea). 2004, p.631-632.
 6. H. Hanaki, T. Asaka, H. Dewa. Beam stabilization in the Spring-8 linac // *Proc. of APAC 2004*. Gyeongju (Korea). 2004, p.256-260.
 7. D. Ibrahim. *Microcontroller Based Applied Digital Control*. John Wiley & Sons, Ltd. 2006, p.311.
 8. PIC16F628A datasheet. <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010210>.
 9. В.А. Кунцевич. *Измерение параметров напряжения различной формы*: Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 1991, с.48.
 10. TC534 datasheet. <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010524>.

Статья поступила в редакцию 25.09.2011 г.

STABILIZATION OF A KLYSTRON ANODE VOLTAGE OF A LINAC RF POWER SYSTEM BY MICROCONTROLLER BASED FEEDBACK

V.A. Kushnir, V.V. Mitrochenko, D.L. Stepin, I.V. Khodak

Nuclear-physics experimentation on linear electron accelerator LU-40 requires the long-term instability of average electron energy to be better than $\pm 0.5\%$. The analysis of the instability factors has shown that one of the reasons is the instability of a klystron current of a linac RF power system. Estimations have resulted to the following: the relative error of electron energy has actually linear dependence on the relative error of a klystron current. It means that the klystron current stability should be also maintained within error of $\pm 0.5\%$. The method of the klystron current maintenance utilizing automated control of a klystron anode voltage has been proposed and implemented. The method was implemented by the introduction of a microcontroller based feedback loop with a PID regulating algorithm. The klystron anode voltage is measured by the developed integrating dual-slope A/D converter that allowed to measure with the accuracy up to $\pm 0.05\%$.

СТАБІЛІЗАЦІЯ АНОДНОЇ НАПРУГИ КЛІСТРОНА СИСТЕМИ НВЧ-ЖИВЛЕННЯ ЛПЕ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ

В.А. Кушнір, В.В. Митроченко, Д.Л. Стьопін, І.В. Ходак

Для проведення ядерно-фізичних експериментів на лінійному прискорювачі електронів ЛПЕ-40 потребується довготривала нестабільність середньої енергії електронів краща, ніж $\pm 0,5\%$. Аналіз факторів нестабільності показав, що одною з причин є нестабільність струму клістрона системи НВЧ-живлення прискорювача. Оцінки показали, що відносна зміна енергії електронів практично лінійно залежить від відносної зміни струму клістрона. Це означає, що стабільність струму клістрона також повинна підтримуватись в межах $\pm 0,5\%$. У роботі запропоновано та реалізовано метод підтримки стабільності струму клістрона шляхом автоматичного регулювання його анодної напруги. Реалізація методу основана на уведенні ланцюга зворотного зв'язку з мікроконтролерним регулюючим елементом, що містить ПІД-закон регулювання. Анодна напруга клістрона вимірюється за допомогою розробленого АЦП подвійного інтегрування, який дозволяє вимірювати напругу з точністю $\pm 0,05\%$.