

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ГЛУБОКОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЭНЕРГИИ И СИСТЕМОЙ ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ МАГНЕТРОНА

*М. А. Гусарова, В. И. Каминский, М. В. Лалаян, С. В. Мацевский*¹

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Создание ускорителей для инспекции крупногабаритных объектов при их транспортировке через границы государств является актуальной задачей. Для получения качественных изображений внутреннего состава инспектируемых объектов ускоритель должен обеспечивать глубокую (дуальную) перестройку энергии пучка от импульса к импульсу [1]. Решению этой задачи посвящен ряд работ, в которых описаны методы и реальные установки с дуальной перестройкой энергии пучка [2–5]. Перестройка энергии достигается ступенчатым изменением мощности на входе ускоряющей секции и/или величины ускоряемого тока. Для обеспечения необходимой энергии и тока пучка в режимах высокой и низкой энергии должны быть специальным образом спроектированы параметры ускоряющей секции. В данной работе проводится сравнение двух схем питания двухсекционного ЛУЭ с перестройкой энергии за счет отключения одной из секций: с использованием циркулятора и волноводного моста.

The creation of accelerators for the inspection of large objects during their transportation across state borders is an important task. To obtain high-quality images of the inspected object internal composition, the accelerator must be able to do a dual switch of beam energy from pulse to pulse [1]. A number of works are devoted to solving this problem, describing methods and real facilities with dual energy switch [2–5]. The energy switch is achieved by a stepwise change in the input power of the accelerating section and/or the magnitude of the accelerated current. In order to provide the necessary energy and beam current in high and low energy modes, the accelerating section parameters must be carefully tuned. This paper compares two power supply schemes of a two-section linac with energy switch due to disconnection of one of the sections using circulators and bridges.

PACS: 29.20.Ej; 87.56.bd

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что основную часть стоимости ускорителя составляют системы его высокочастотного питания [6]. Возможные варианты системы питания ускорителей прикладного применения базируются на усилительных клистродах либо на магнетронных автогенераторах. При применении клистронов достаточно просто обеспечивать

¹E-mail: SVMatsiyevskij@mephi.ru

высокую стабильность его частоты, что важно при применении секций на основе высокочастотных бипериодических ускоряющих структур. Обеспечение глубокой перестройки мощности клистроны является несложной технической задачей. Магнетроны обладают меньшей стабильностью частоты, глубокая перестройка их мощности связана с существенными проблемами. Однако стоимость усилительных клистронов существенно выше стоимости магнетронов. В связи с этим экономическим обстоятельством является целесообразным рассмотрение вариантов создания прикладных ускорителей электронов с глубокой перестройкой энергии на базе магнетронов. Поиск вариантов схем системы высокочастотного питания на базе магнетрона следует проводить по пути секционирования ускоряющих структур на две и более секций, выбора методов регулирования мощности на входе секций без изменения мощности магнетрона, изменения режимов ускорения пучка в секциях. Обеспечение таких режимов может достигаться с помощью импульсно переключаемых устройств: импульсных пороговых фазовращателей, импульсных режекторных фильтров. Разработки импульсных переключателей, работающих при достаточно высоком уровне мощности, осуществлялись для компрессоров СВЧ-энергии различного типа (см. например, [7]).

В современных ускорителях на небольшие энергии повсеместно применяются ускоряющие секции на основе бипериодической ускоряющей структуры, заменившие ускоряющие структуры на базе круглого диафрагмированного волновода. Основным преимуществом бипериодической структуры является высокое шунтовое сопротивление, обеспечивающее компактность ускорителя.

При этом вследствие высокой добротности в бипериодической структуре время переходного процесса достаточно велико, а также имеются существенные требования к стабильности частоты питающего генератора. Для достижения устойчивой работы магнетрона необходимо использование развязывающих устройств — ферритовых изоляторов (вентилей или циркуляторов) либо волноводных мостов [8].

Достоинствами мостовой развязки являются возможность включения моста в вакуумную систему ускорителя, что обеспечивает его высокую электрическую прочность, отсутствие потерь мощности в мосте, что исключает необходимость его принудительного охлаждения, меньшая стоимость и больший срок службы по сравнению с ферритовой развязкой. Недостатками ферритового циркулятора являются ограниченная электрическая прочность, требующая заполнения развязки элегазом, ощутимые потери мощности в циркуляторе, требующие его принудительного охлаждения. Выбор типа развязывающего устройства определяется технико-экономическими и массогабаритными условиями, налагаемыми на конкретную установку.

Для обеспечения глубокой регулировки энергии пучка в данной работе рассмотрены конструктивные решения, обеспечивающие отключение одной из ускоряющих секций в режиме низкой энергии.

СХЕМА ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ ЦИРКУЛЯТОРА

Самой очевидной схемой питания двухсекционного ЛУЭ является совмещенная схема двух односекционных ускорителей, изображенная на рис. 1. В ней СВЧ-мощность от источника 1 после прохождения через циркулятор 2 делится при помощи волноводного моста 3 между ускоряющими резонаторами секций 4 и 5, построенных

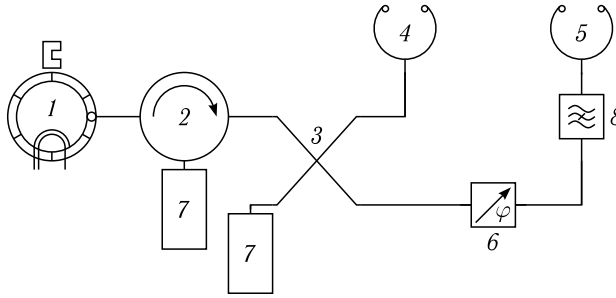


Рис. 1. Схема питания двухсекционного ЛУЭ с волноводным мостом и циркулятором

на основе ячеек бипериодической ускоряющей структуры (БУС). Подстройка относительной фазы в секциях осуществляется при помощи фазовращателя 6, излишняя мощность отводится в поглощающие нагрузки 7. Для изменения энергии пучка режекторный фильтр 8 отключает секцию 5. При этом значение половинного уровня энергии можно выбрать на этапе проектирования, изменяя соотношение количества ячеек в секциях.

Секции на стоячей волне будут работать при критической связи с подводщими волноводами, и значения подводимой мощности и их коэффициентов связи можно рассчитать при помощи выражений [8]

$$P_{\text{вх}} = \frac{E_{\text{yc}}^2 n D}{2r_{\text{ш}}^{\text{эф}}} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{I_{\text{п}} r_{\text{ш}}^{\text{эф}}}{E_{\text{yc}}} \right)^2} \right) \quad (1)$$

и

$$\beta = \left[\frac{I_{\text{п}}}{2} \sqrt{\frac{r_{\text{ш}}^{\text{эф}} n D}{P_{\text{вх}}}} + \sqrt{1 + \frac{I_{\text{п}}^2 r_{\text{ш}}^{\text{эф}} n D}{4 P_{\text{вх}}}} \right]^2, \quad (2)$$

где E_{yc} — ускоряющий градиент; n , D и $r_{\text{ш}}^{\text{эф}}$ — количество, период и погонное шунтовое сопротивление ячеек БУС соответственно; $I_{\text{п}}$ — ток пучка.

В качестве режекторного фильтра 8 используется разрядник, способный переключаться от импульса к импульсу ускорителя. При зажигании разряда мощность, подводимая к секции 5, отражается и рассеивается в поглощающих нагрузках 7. При этом кусок передающей линии, соединяющий разрядник 8 и секцию 5, закорачивается и включается в резонансный контур ячейки ввода мощности, сильно смещая ее резонансную частоту. Вследствие этого количество ячеек в секции 5 сокращается на одну и на рабочей частоте резонанса в ней не возникает. Благодаря этому передача энергии между пучком и выключенной секцией в среднем будет нулевая.

Можно упростить схему питания на рис. 1, убрав волноводный мост. На рис. 2 изображена модифицированная схема без мостового соединения и одной из поглощающих нагрузок. В ней СВЧ-мощность от источника 1 после прохождения через циркулятор 2 поступает на вход секции 4, и только отраженная от нее мощность поступает в секцию 5. Очевидно, что в этом режиме работы секция 4 не может работать в критическом режиме, иначе в секцию 5 не будет поступать мощность. Определим

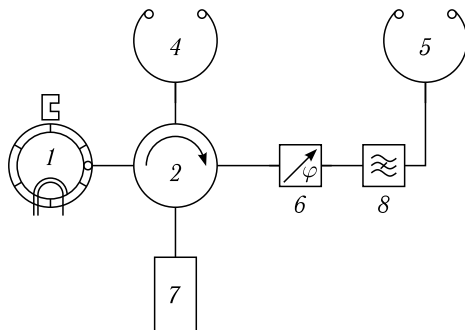


Рис. 2. Схема питания двухсекционного ЛУЭ с циркулятором

величину мощности, которая должна отразиться от секции 4 и поступить на вход секции 5.

Для двух секций можно записать выражение баланса мощностей в виде

$$\begin{cases} P_{\text{вх}}^{\text{I}} = P_{\text{пот}}^{\text{I}} + P_{\text{пуч}}^{\text{I}} + P_{\text{отр}}^{\text{I}}, \\ P_{\text{вх}}^{\text{II}} = P_{\text{пот}}^{\text{II}} + P_{\text{пуч}}^{\text{II}} + P_{\text{отр}}^{\text{II}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $P_{\text{вх}}$, $P_{\text{пуч}}$, $P_{\text{пот}}$ и $P_{\text{отр}}$ — входная мощность, мощность пучка, мощность потерь и отраженная мощность соответственно.

С помощью выражения

$$P_{\text{отр}} = P_{\Gamma} \left(\frac{\beta - 1 - \sqrt{\frac{r_{\text{ш}}^{\text{эф}} n D}{P_{\Gamma}} I_{\text{п}} \sqrt{\beta}}}{\beta + 1} \right)^2 \quad (4)$$

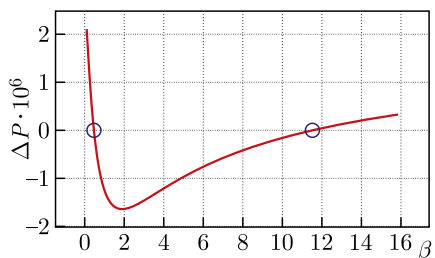


Рис. 3. Зависимость разности отраженной от первой секции и требуемой для второй секции мощностей от коэффициента связи первой секции. Кружками обозначены оптимальные значения коэффициента связи

можно определить величину отраженной от первой секции мощности для заданного коэффициента связи β . Оптимальным будет режим работы ускорителя, при котором отраженная от первой секции мощность полностью расходуется во второй секции: $P_{\text{отр}}^{\text{I}} - P_{\text{вх}}^{\text{II}} = 0$. График зависимости разности мощностей ускорителя с током пучка 0,3 А и энергией 10 МэВ представлена на рис. 3.

Корни этой функции соответствуют значениям коэффициента связи, при котором величина мощности, отраженная от первой секции, равна значению мощности, требующейся для питания второй секции. Один корень соответствует пересвязанной секции, второй — недосвязанной.

С точки зрения работы системы питания в стационарном режиме эти два случая различаются только фазой отраженной от первой секции волны, однако при рассмот-

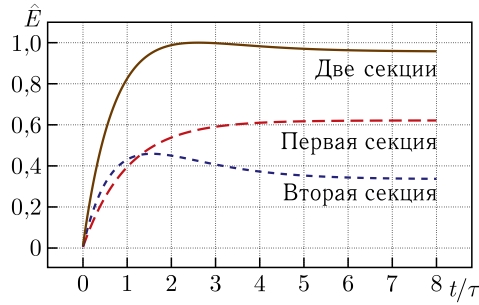


Рис. 4. Графики переходных процессов в секциях ускорителя для недосвязанной секции

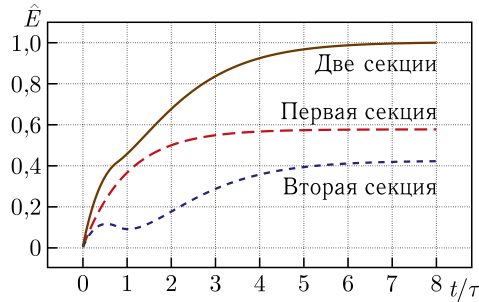


Рис. 5. Графики переходных процессов в секциях ускорителя для пересвязанной секции

рени переходных процессов разница оказывается более значительной. Для расчета амплитуды и мощности отраженной от секции волны можно воспользоваться выражениями [9]

$$V(t) = \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \sqrt{\frac{4}{\tau} \frac{\beta}{1+\beta}} \int_0^t \sqrt{P_g(t)} \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) dt \quad (5)$$

и

$$\hat{P}_{\text{отр}}(t) = \left[\left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)\right) \frac{2\beta}{1+\beta} - 1 \right]^2. \quad (6)$$

На рис. 4 и 5 изображены графики переходных процессов в секциях ускорителя в случае недосвязанной и пересвязанной первой секции ускорителя соответственно.

Как видно из представленных зависимостей, в обоих случаях СВЧ-мощность по окончании переходного процесса неравномерно распределена между секциями. Следовательно, после начала импульса тока произойдет значительное перераспределение мощности и поведение пучка в начале второго переходного процесса будет значительно отличаться от стационарного режима работы, из-за чего темп ускорения будет снижен и существенно расширится энергетический спектр ускоренного пучка.

СХЕМА ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ МОСТА

Схему на рис. 2 можно видоизменить, избавившись от циркулятора, как показано на рис. 6. Здесь мощность от генератора 1 делится между секциями 2 и 3 направленным ответвителем 4. Чтобы исключить отражение мощности к генератору, каждая

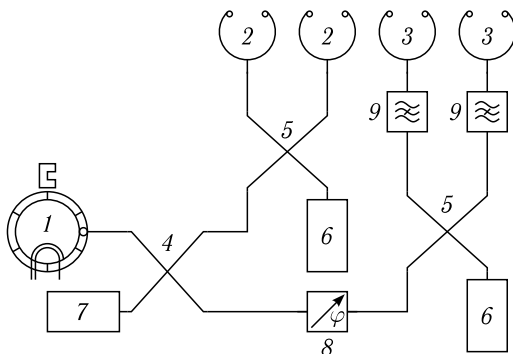


Рис. 6. Схема питания двухсекционного ЛУЭ с мостовой развязкой

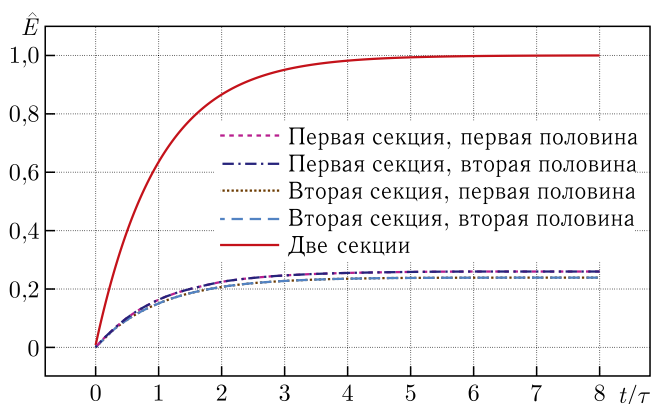


Рис. 7. Переходный процесс в секции с мостовой развязкой

секция разделена на две равные части, соединенные мостами 5, благодаря чему отраженная мощность рассеивается в поглощающих нагрузках 6. В нагрузку 7 отражается только небольшая часть мощности, возникающая из-за погрешностей изготовления и настройки секций. В частном случае направленный ответвитель 4 может быть волноводным мостом. При этом обеспечиваются равные величины мощности на входе секций 2 и 3 и одинаковый набор энергии в них. Подстройка фазы между секциями производится фазовращателем 8. Как и в схеме на рис. 2, энергия меняется за счет отключения секции 3 при помощи пары режекторных фильтров 9. На рис. 7 представлен переходный процесс в секции с мостовой развязкой. Он ничем не отличается от переходного процесса схемы питания на рис. 1, поскольку нагруженные добротности у секций имеют одинаковые значения. Как видно из представленной зависимости, напряженность поля в секциях в конце переходного процесса имеет одинаковое значение, благодаря чему перераспределения мощности как в случае, изображенном на рис. 4 и 5, происходить не будет, что положительно скажется на характеристиках ускоряемого пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено сравнение двух схем питания ЛУЭ с перестройкой энергии за счет отключения одной из секций: с использованием циркулятора и волноводного моста.

Получены и проанализированы характеристики переходных режимов в обоих типах ускорителей, обсуждены некоторые технико-экономические и конструктивные особенности рассмотренных ускорителей. Показано, что схемы на основе циркулятора (см. рис. 1) и направленного ответвителя (см. рис. 6) не различаются с точки зрения питания, и выбор той или иной схемы должен быть сделан исходя из требований к размеру и массе устройства, конструкции вакуумной системы и др. Рассмотрена упрощенная схема питания на основе циркулятора без направленного ответвителя (см. рис. 2). Видно, что для этой схемы характер переходного процесса налагает значительные ограничения на ее использование, поэтому она может применяться только при невысоких требованиях к энергетическому спектру ускоряемого пучка.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ogorodnikov S., Petrunin V.* Processing of Interlaced Images in 4–10 MeV Dual Energy Customs System for Material Recognition // *Phys. Rev. ST. Accel. Beams.* 2002. V. 5. P. 104701; URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.5.104701>.
2. *Lee K., Hashimoto E., Yamamoto T., Natsui T., Mori A., Hirai S., Uesaka M.* Design and Experiment of Dual-Energy X-Ray Material Recognition Using a 950 keV X-Band Linac // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 637, No. 1, Suppl. P. S54–S56; The Intern. Workshop on Ultra-Short Electron & Photon Beams: Techn. and Appl.; URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210002196>.
3. *Zavadtsev A., Zavadtsev D., Krasnov A., Sobenin N., Kutsaev S., Churanov D., Urbant M.* A Dual-Energy Electron Linac for Cargo Inspection System // *Instrum. Exp. Tech.* 2011. V. 54, No. 2. P. 241–248.
4. *Shvedunov V., Alimov A., Ermakov A., Kamanin A., Khankin V., Kurilik A., Ovchinnikova L., Pakhomov N., Shvedunov N., Yurov D., Shvedunov I., Simonov A.* Electron Accelerators Design and Construction at Lomonosov Moscow State University // *Radiat. Phys. Chem.* 2019. V. 159. P. 95–100; URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X18309423>.
5. *Ermakova A. N., Alimova A. S., Ishkhanova B. S., Frejdovich I. A., Kamanin A. N., Klementiev V. V., Khankin V. V., Lamonov S. V., Ovchinnikova L. Yu., Pakhomov N. I., Pavshenko Yu. N., Simonov A. S., Shvedunov I. V., Shvedunov N. V., Shvedunova V. I., Vladimirov I. Yu., Yurov D. S.* Main Parameters and Operational Experience with New Generation of Electron Accelerators for Radiography and Cargo Inspection // *Proc. of RuPAC2014.* 2014.
6. *Вологушин М. Ф., Малышев В. Н.* Высокочастотное питание ускорителей прикладного назначения. М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. *Августинович В. А., Артеев М. С., Артеменко С. Н., Новиков С. А., Юшков Ю. Г.* Синхронизация резонансных СВЧ-компрессоров лазером // *Письма в ЖТФ.* 2010. Т. 36.
8. *Sobenin N. P., Zverev B. V.* *Electrodynamic Characteristics of Accelerating Cavities.* CRC Press, 2020.
9. *Левичев А. Е., Павлов В. М.* *Линейные СВЧ-ускорители.* РИЦ НГУ, 2015.