

БАЛАНС ЭНЕРГИИ В ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОМ ЛИНЕЙНОМ ИНДУКЦИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ

Гурин А.Г., д.т.н., проф., Ложкин Р.С.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электроизоляционной и кабельной техники"

тел. (0572) 70-76-663, E-mail: AGurin@kpi.kharkov.ua

В статті наведено головні аналітичні формули для розрахунку балансу енергії в високоенергетичному лінійному індукційному прискорювачі (ЛІП) великої середньої потужності, призначеному для промислових цілей. Показано взаємозв'язок поміж енергетичними, електричними і конструкційними параметрами прискорювальної та супровідної систем ЛІП.

В статье приведены основные аналитические выражения для расчета баланса энергии в высокоэнергетичном линейном индукционном ускорителе (ЛИУ) большой средней мощности, предназначенном для промышленных целей. Показана взаимосвязь между энергетическими, электрическими и конструкционными параметрами ускоряющей и сопровождающей систем ЛИУ.

ВВЕДЕНИЕ

Линейные индукционные ускорители в настоящее время находят всё более широкое применение в различных областях промышленности. Наибольший интерес приобретают те технологические применения, в которых пучок электронов выводят из вакуума в обрабатываемую среду. Это: стерилизация медицинских изделий, создание вакцин, очистка выбросных газов, очистка воды (пучково-озонная технология), и многие другие. Для большинства технологических применений требуемая энергия пучка не превышает 10 МэВ, а требуемая средняя мощность лежит в диапазоне от нескольких десятков киловатт до 1 МВт и более. Преимуществом ЛИУ перед другими типами ускорителей является возможность генерации пучков с наибольшей средней мощностью (от 200 кВт до 1 МВт и более) при относительно невысокой энергии ускоренных частиц, не приводящей к возникновению наведенной радиации (не более $6 \div 10$ МэВ, в зависимости от свойств материала выпускных окон). Задача создания ЛИУ большой средней мощности особенно актуальна для пучково-озонной очистки воды, потребляемой крупными населенными пунктами. Например, для обеззараживания коммунальных стоков такого города, как Харьков ($500000 \text{ м}^3/\text{сут}$) дозой $1,2 \text{ кГр}$ [1], требуемая средняя мощность электронного пучка составляет 6,95 МВт. Пучково-озонная технология очистки воды является наиболее универсальным и экологически безопасным средством обеззараживания воды от патогенных микроорганизмов и синтетических высокомолекулярных веществ по сравнению с хлорированием, так как хлорирование ведёт к образованию широкого спектра канцерогенных хлорорганических веществ, пагубно влияющих на человека и фауну. Во многих странах мира в настоящее время проводятся многочисленные исследования по применению электронных пучков для различных экологических целей.

До настоящего времени большинство линейных индукционных ускорителей создавалось для чисто

экспериментальных целей. Эти ускорители имели небольшую среднюю мощность (несколько десятков киловатт), невысокий общий КПД и не были рассчитаны на длительный режим бесперебойной работы. Поэтому в литературе описание энергетических процессов, происходящих в ЛИУ, имеет разрозненный характер, и не полное.

Для создания ЛИУ большой мощности с длительным режимом непрерывной работы нужно знать о всех возможных потерях энергии в процессе эксплуатации. Это необходимо для правильного расчета тепловой устойчивости секций ЛИУ, а также позволяет выявить пути удешевления конструкции и повышения общего КПД ускорителя.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛИУ

Компоновочная схема промышленного варианта ЛИУ представлена на рис. 1. Принцип действия ЛИУ аналогичен принципу действия импульсного трансформатора. Его силовой частью является индукционная система, состоящая из набора индукторов, каждый из которых имеет изолированный ферромагнитный сердечник и виток намагничивания (первичный виток). Индукционную систему охватывает вторичный контур, состоящий из ускоряющих электродов и корпуса ускорителя. Металлический корпус ускорителя выполняет роль токопровода и экрана, ограничивающего область действия вихревого электрического поля. Индуцированное во вторичном контуре напряжение обеих полусекций суммируется на ускоряющем зазоре и осуществляет ускорение заряженных частиц, двигающихся в ускорительном тракте вдоль оси системы. При этом потенциалы на ускоряющих электродах равны по модулю и противоположны по знаку. Ускоряющее напряжение каждой полусекции U_n прикладывается к размещенной в ней дроссельной катушке, уложенной вдоль вакуумного изолятора. Дроссель предназначен для пропускания

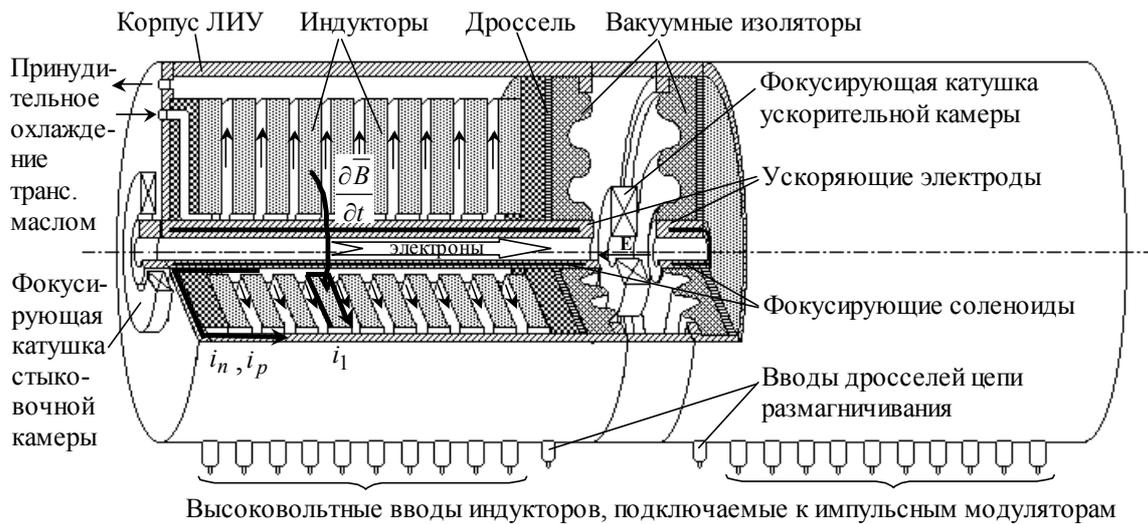


Рис. 1. Упрощенная компоновочная схема секции ЛИУ.

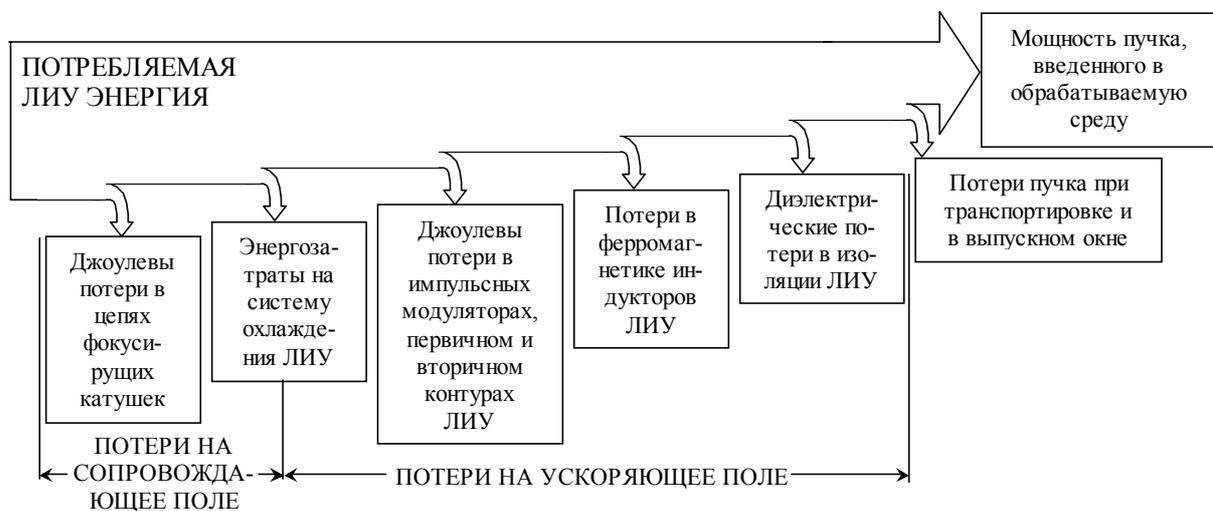


Рис. 2. Классификация потерь в ЛИУ.

постоянного размагничивающего тока i_p во вторичный контур ЛИУ, возвращающего в отрицательное насыщение ферромагнетика индукторов в паузе между ускоряющими импульсами, и для ограничения броска тока от приложенного ускоряющего напряжения. Значение $i_p \ll i_1$, так как ЛИУ работает в микросекундном диапазоне с большой глубиной скважности ускоряющих импульсов. Конструкция катушки предусматривает наиболее равномерное распределение потенциалов по вакуумному изолятору, что повышает значение напряжения перекрытия. Для транспортировки пучка в ускорительном тракте создается постоянное и однородное продольное магнитное поле фокусирующими катушками. Для отвода тепла, выделяемого в секции, предусмотрено принудительное охлаждение трансформаторным маслом. Обмотка фокусирующей катушки ускорительной камеры может быть изготовлена из полый медной шинки для охлаждения её продуваемым воздухом, так как в вакууме конвективный теплообмен отсутствует. Количество ускоряющих секций определяется требуемой мощностью и энергией пучка на выходе ускорителя.

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПОТЕРЬ В ПОЛУСЕКЦИИ ЛИУ

На рис. 2 представлена структурная схема, поясняющая основные виды потерь в ЛИУ. Рассмотрим более подробно наиболее существенные виды потерь, происходящих в ускоряющей полусекции ЛИУ.

При разработке конструкции ЛИУ исходными параметрами являются рабочий импульсный ток пучка I_n кА, и его энергия $eU = 2eU_n$ МэВ на входе в канал электрода после прохождения первого ускоряющего зазора. Значение I_n ограничено значением предельного тока пучка, который можно транспортировать в металлической трубе [3]:

$$I_{\text{макс}} = 17 \frac{(\gamma^{2/3} - 1)^{3/2}}{1 + 2 \ln(b/a)} \text{ кА}; \quad \gamma = 1 + eU / (mc^2), \quad (1)$$

где mc^2 – энергия покоя частицы, МэВ; a и b – радиусы пучка и канала электрода (в см). Для удержания пучка в трубе длинным соленоидом создается магнитное поле, определяемое из условия:

$$aB \geq 0,12(\gamma I_n)^{1/2} \quad (2)$$

где B – магнитная индукция, в Тл. Вдали от торцов длинного соленоида $B = \mu_0 I_c n$, где I_c – ток соленоида, А; n – количество витков на 1 м длины. **Потери в соленоиде** при этом составят

$$P_c = I_c^2 \cdot \rho \frac{\pi b_c}{50S} nl \text{ Вт}; \quad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление, Ом·м; S – сечение провода, м²; l – длина соленоида, м; $b_c = b + \Delta b$ – радиус соленоида, см; Δb обусловлено толщиной стенки трубы, толщиной изоляции соленоида, и т. д.. При определении B из (2) радиус a принимают меньшим b , но с учетом ограничения, накладываемого выражением (1). Из выражения (2) и (3) следует, что увеличение a при $b/a = const$ практически пропорционально снижает потери в соленоиде за счет снижения требуемого значения B , так как это снижает значение I_c .

Потери в ферромагнитной системе на рабочем цикле. Согласно теории импульсного перемагничивания [3], потери в ферромагнитной ленте при воздействии импульса магнитного поля $H(t) = i(t)/(2\pi r)$, определяются выражением:

$$w(r) = 4\pi r B_s b \delta \int_0^{T_n} H(t) \frac{d\lambda}{dt} dt \text{ Дж}; \quad (4)$$

где T_n – время полного перемагничивания в течение рабочего цикла, с; $i(t) = i_1(t) - i_n(t) - i_p$ – функция перемагничивающего импульса тока (ток пучка $i_n(t)$ и размагничивающий ток i_p оказывает размагничивающее действие по отношению к току импульсного модулятора $i_1(t)$); b – ширина ленты, м; δ – её толщина, м; r – радиус ленты, м; B_s – индукция насыщения, Тл.

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{H(t) - H_0}{\sqrt{S_{\omega 0}^2 + 4S_{\omega e} \left(\int_0^t H(\tau) d\tau - H_0 t \right)}}. \quad (5)$$

Здесь $S_{\omega 0}$ и $S_{\omega e} = (1/4)\sigma\delta^2 B_s$ – коэффициенты переключения, учитывающие магнитную вязкость и вихревые токи, Кл/м; σ – удельная проводимость ферромагнетика, 1/(Ом·м); H_0 – поле старта, А/м. Следует отметить, что при меньшем значении r и неизменном H меньше и потери на перемагничивание. Отсюда следует вывод, что уменьшение радиальных размеров сердечников способствует снижению потерь. Мощность потерь во всей ферромагнитной системе полусекции составляет:

$$P_{\phi p} = f \cdot N \cdot \sum_{k=0}^{(R_2 - R_1)K_3 / \delta} w(r = R_1 + k\delta / K_3) \text{ Вт}; \quad (6)$$

где R_1 и R_2 – внутренний и внешний радиусы сердечников, м; K_3 – коэффициент заполнения; N – количество индукторов; f – частота посылок, Гц.

Потери в изоляции. В осесимметричной конст-

рукции ЛИУ в течение рабочего импульса действует вихревое электрическое поле, описываемое II уравнением Максвелла, которое наводит напряжение $u_{эл}$ между металлическими элементами конструкции (в масляных зазорах между индукторами, в изоляции сердечников; между ускоряющим электродом и индукторами; в вакуумном изоляторе). С учетом (5):

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = -2B_s \frac{\partial \lambda}{\partial t}; \quad u_{эл} = \int_L \bar{E} d\bar{l}, \quad (7)$$

где L – путь по металлу, соединяющем разные элементы. После нахождения функции $u_{эл}(t)$ и разложения её (или более простой функции, близкой по форме, с учетом частоты посылок) в ряд Фурье, мощность диэлектрических потерь можно определить как:

$$P_{из.эл.} = \sum_{k=1}^{\infty} \omega_k C_k U_k^2 tg\delta_k, \text{ Вт}$$

Значение мощности, потребляемой полусекцией, можно представить суммой мощностей:

$$P = P_c + P_{\phi p} + P_{\phi o} + P_{из} + P_{акт} + P_n,$$

где $P_{\phi o}$ – потери в ферромагнетике на обратном цикле ($P_{\phi o} \ll P_{\phi p}$); $P_{из}$ – суммарные потери в изоляции; $P_{акт}$ – джоулевы потери в первичном и вторичном контурах ЛИУ; P_n – мощность, переданная пучку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены основные виды потерь в полусекции ЛИУ. Исходя из изложенного материала видно, что создание оптимальной конструкции ускорителя с максимальным КПД возможно только при комплексном подходе к выбору параметров, учитывающем взаимосвязь ускоряющей и сопро-вождающей систем ЛИУ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бабич Є.М., Гладков В.С., Корнілов Є.О. та ін. Екологічно чиста та економічна пучково-озонна технологія стерилізації та очистки питної води та стічних вод. \ Еко-технології і ресурсо-збереження. 2001, № 6, с. 40-43.
- [2] Абрамян Е.А., Альтеркоп Б.А., Кулешов Г.Д.. Интенсивные электронные пучки. Физика. Техника. Применение. М.: Энергоатомиздат, 1984. с. 25-27.
- [3] Гурин А.Г., Ложкин Р. С.. Определение потерь в витых тороидальных сердечниках при импульсном перемагничивании. \ Вестник НТУ "ХПИ", Вып. 7, "Электроэнергетика и преобразовательная техника", Харьков 2004, с.73-76.

Поступила 14.10.2004