

УДК 621.384.64(045)

В.Т. Чемерис, канд. техн. наук, доц.
І.В. Губанов, канд. фіз.-мат. наук, доц.
О.О. Подворний, студ.

ІНЖЕНЕРНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ТА ВИБОРУ ГОЛОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКТОРІВ ЛІНІЙНОГО ІНДУКЦІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА

НАУ, кафедра теоретичної фізики
E-mail: nau@edu.ua

Обґрунтовано та розроблено методику спрощеного розрахунку та вибору оптимальних параметрів індукційної системи електронно-променевого стерилізатора на основі лінійного індукційного прискорювача з урахуванням параметрів магнітного матеріалу для виготовлення осердь та параметрів імпульсу напруги.

There is a method of simplified calculation and design parameters choice elaborated in this article with corresponding basing for the induction system of electron-beam sterilizer on the base of linear induction accelerator taking into account the parameters of magnetic material for production of cores and parameters of pulsed voltage.

Постановка проблеми

Індукційна система лінійного індукційного прискорювача призначена для створення у вакуумному каналі прискорювача поздовжнього імпульсного електричного поля, призначеного для прискорення електронного пучка до енергії 2 МеВ і більше.

Необхідність вибору оптимальних технічних та масогабаритних показників індукційної системи прискорювача електронів на сьогодні є дуже актуальною проблемою [1], оскільки пов'язана з можливістю ефективного використання матеріалу феромагнітних осердь та потужності джерел імпульсного струму.

На відміну від існуючих запропонована методика спрощеного розрахунку та вибору оптимальних параметрів індукційної системи базується на простих математичних співвідношеннях і може бути використана в інженерній практиці із застосуванням найпростіших обчислювальних засобів.

Обґрунтування методики розрахунку параметрів

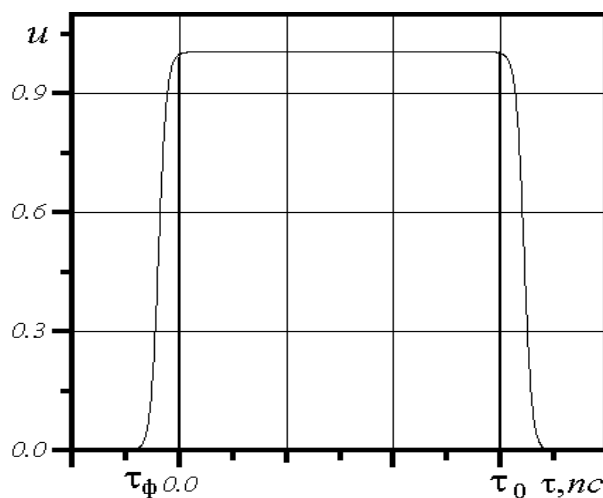
В основу методики розрахунку закладені співвідношення між параметрами процесів імпульсного перемагнічування, які можна знайти у працях [2–4]. Розміри феромагнітних осердь та співвідношення між параметрами електричної енергії у первинних та вторинних колах індукторів визначаються на підставі фундаментальних співвідношень, відомих з теоретичної електротехніки. Головним об'єктом аналізу в процесі розрахунків є визначення раціонального співвідношення між середнім діаметром індукторів та довжиною індукторної системи відповідно до заданої енергії електронного пучка.

Для розрахунку індукторів обираємо магнітний матеріал MetGlas2506CO, що виготовляється у США у вигляді феромагнітної стрічки, що має ізоляційну основу.

Магнітний матеріал MetGlas2506CO має такі параметри:

Товщина стрічки d , мкм	15(max 18)
Індукція насичення B_s , Тл	1,8
Коерцитивна сила H_c , А/м	3
Найбільша відносна магнітна проникність μ_{max}	400 000
Питомий електричний опір ρ , мкОм·см	123
Максимальна робоча температура, °С менше	125
Коефіцієнт заповнення k_z , %	75
Густина матеріалу g , г/см ³	7,56
Питомі втрати на перемагнічування P , Вт/м ³	9
Магнітострикція, ppm	35

Спрощена форма імпульсу напруги, що була взята для розрахунків, зображена на рисунку.



Імпульс напруги

Нормований імпульс напруги як функцію часу, визначають за формулою

$$u = \frac{U(t)}{U_0},$$

де U_0 – робоча напруга.

Розглянемо очікувані параметри імпульсу напруги, що подається від джерела:

Амплітуда, кВ..... 50

Тривалість вершини імпульсу τ_0 , нс100÷200

Тривалість фронтів зростання / спаду τ_ϕ , нс30÷50

Для розрахунку взято такі початкові розміри осердя:

Внутрішній діаметр d , мм150

Висота h , мм25

Активний переріз феромагнітного осердя S_{Fe} розраховуємо за формулою

$$\frac{U\tau}{S_{Fe}\Delta B} = 1;$$

$$S_{Fe} = \frac{U\tau}{\Delta B} = \frac{U(\tau_0 + 2\tau_\phi)}{\Delta B};$$

$$S_{Fe} = \frac{50 \cdot 10^3 (100 \div 200 + 2(30 \div 50)) 10^{-9}}{2,52 - 3,24} =$$

$$= \frac{5 \cdot 160 \cdot 10^{-6}}{3,24} - \frac{5 \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{2,52} = (247 - 595) 10^{-6} \text{ м}^2,$$

де ΔB – перепад магнітної індукції:

$$\Delta B = 2(0,7 \div 0,9) B_s,$$

B_s – індукція насичення для феромагнітного матеріалу, тобто

$$\Delta B = 2[(0,7 \div 0,9) 1,8] = 2,52 - 3,24 \text{ Тл.}$$

Для виготовлення тороїдального осердя найчастіше використовують стандартну стрічку матеріалу MetGlas шириною $h = 25$ мм.

Розрахункова товщина намотаного пакета осердя індуктора (без товщини шарів ізоляції) буде дорівнювати

$$b = \frac{S}{h};$$

$$b = \frac{247 \cdot 10^{-6}}{2,5 \cdot 10^{-3}} - \frac{595 \cdot 10^{-6}}{2,5 \cdot 10^{-3}} = (98,8 - 238) 10^{-3} \text{ м,}$$

тобто

$$b = 9,9 - 23,8 \text{ см.}$$

Ефективний зовнішній діаметр осердя

$$D = d + 2b;$$

$$D = 15 + 2(9,9 - 23,8) = 34,8 - 62,6 \text{ см.}$$

З урахуванням коефіцієнта заповнення реальний зовнішній діаметр осердя

$$D_r = \frac{D}{k_z}; \quad D_r = \frac{34,8}{0,75} - \frac{62,6}{0,75} = 46,4 - 83,5 \text{ см.}$$

Середня величина з цього інтервалу $\bar{D}_r = 65$ см.

Трохи зменшимо реальний зовнішній діаметр від середнього значення для зниження маси осердя:

$$D_r = 53 \text{ см.}$$

Вибір товщини стрічки

Товщину стрічки для намотування осердя розраховуємо за формулою

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho\tau}{0,048\mu_0\mu_\Delta}} \approx 4071 \sqrt{\frac{\rho\tau}{\mu_\Delta}};$$

$$\delta = 4071 \sqrt{\frac{123 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-2} (160 \div 300) 10^{-9}}{10^4}} =$$

$$= 4071 \cdot 10^{-11} \sqrt{1230(160 \div 300)} =$$

$$= (18 \div 25) 10^{-6} \text{ м} = 18 \div 25 \text{ мкм.}$$

Відносна магнітна проникність на частковому циклі перемагнічування у цьому разі взята, як для пермалою марки 50НП ($\mu_\Delta = 10000$), оскільки її точне значення для матеріалу MetGlas2506CO поки що невідоме.

Як більш доцільне обираємо менше значення товщини стрічки 15 мкм з урахуванням параметрів магнітного матеріалу MetGlas2506CO.

Визначення маси матеріалу осердя

Для визначення маси матеріалу осердя обрахуємо об'єм матеріалу осердя:

$$V = \frac{\pi}{4} h (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{2} h b (D + d);$$

$$V = \frac{3,1415}{2} 2,5 \cdot 10^{-2} (9,9 - 23,8) 10^{-2} \cdot (15 +$$

$$+ (34,8 - 62,6)) 10^{-2} =$$

$$= 3,9 \cdot 10^{-6} \cdot 9,9 \cdot 49,8 - 3,9 \cdot 10^{-6} \cdot 23,8 \cdot 62,6 =$$

$$= (1,92 - 5,81) 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Масу одного осердя обчислимо за формулою

$$m = gV;$$

$$m = 7,65 \cdot 10^3 (1,92 - 5,81) 10^{-3} = 14,7 - 44,5 \text{ кг.}$$

Для розрахунку маси феромагнітного матеріалу визначимо:

– ефективний діаметр:

$$\bar{D} = D_r k_z;$$

$$\bar{D} = 0,53 \cdot 0,75 = 0,4 \text{ м};$$

– об'єм феромагнітного матеріалу осердя:

$$V = \frac{\pi}{4} h (D - d)(D + d);$$

$$V = \frac{3,1415}{2} 0,025(0,4 - 0,15)(0,4 + 0,15) =$$

$$= 0,0196 \cdot 0,25 \cdot 0,55 = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3;$$

– масу осердя:

$$M_f = gV;$$

$$M_f = 7,56 \cdot 10^3 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} = 20,5 \text{ кг.}$$

Ураховуючи додаткову масу ізоляції, можемо вважати, що в підсумку маса ізольованого осердя дорівнює

$$M = (1,1 \div 1,2)M_f; M = 22 - 25 \text{ кг.}$$

На підставі проведеного розрахунку вибрані такі розміри осердя:

Внутрішній діаметр d , мм150

Зовнішній діаметр D , мм530

Висота h , мм25

Маса, кг23,5

Товщина стрічки δ , мкм15 (max 18)

Коефіцієнт заповнення k_z , %80 (min 75)

Розрахунок вихрового струму та струму перемагнічування

Довжину силової магнітної лінії визначаємо за формулою

$$l_\Gamma = \pi \frac{D - d}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)};$$

$$l_\Gamma = 3,1415 \frac{53 - 15}{\ln\left(\frac{53}{15}\right)} = \frac{3,1415 \cdot 38}{\ln(3,5(3))} = \frac{119,4}{1,262} = 94,6 \text{ см.}$$

Вихровий струм в осерді обчислюємо за рівнянням

$$I_B = \frac{U l_\Gamma \delta^2}{12 S_{Fe} \rho}.$$

Оскільки

$$S_{Fe} = \frac{D - d}{2} h; S_{Fe} = \frac{(0,4 - 0,15)}{2} 0,25 = 0,03125 \text{ м}^2,$$

то вихровий струм в осерді становить

$$I_B = \frac{5 \cdot 10^4 \cdot 0,946 (15 \div 20)^2 10^{-12}}{12 \cdot 0,03125 \cdot 123 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-2}} =$$

$$= \frac{5 \cdot 0,946 (15 \div 20)^2}{12 \cdot 0,03125 \cdot 123} = 23,1 \div 41,02 \text{ А.}$$

Середнє значення вихрового струму в осерді з цього інтервалу буде

$$I_B = 32 \text{ А.}$$

Формула струму перемагнічування наприкінці імпульсу має вигляд

$$I_\mu = \Delta H_\mu l_\Gamma,$$

де ΔH_μ – перепад напруженості магнітного поля в осерді:

$$\Delta H_\mu = \frac{\Delta B_c}{\mu_0 \mu_\delta};$$

$$\Delta H_\mu = \frac{2,52 \div 3,24}{4\pi 10^{-7} \cdot 10^4} = 200 \div 258 \text{ А/м.}$$

Ефективне значення магнітної проникності пакета осердя μ_δ дорівнює проникності на частковому циклі перемагнічування, тобто

$$\mu_\delta \approx \mu_\Delta = 10\,000.$$

Струм перемагнічування наприкінці імпульсу тепер буде

$$I_\mu = (200 \div 258) 0,946 = 189,2 \div 244,1 \text{ А.}$$

Середнє значення струму перемагнічування з цього інтервалу дорівнює

$$I_\mu = 216,5 \text{ А.}$$

Сумарну енергію, що витрачається на перемагнічування осердя, визначаємо за формулою

$$W = W_B + W_\mu = U I_B \tau + U \frac{I_\mu}{2} \tau;$$

$$W = 5 \cdot 10^4 \cdot (160 \div 300) \cdot 10^{-9} (32 + 216,5/2) =$$

$$= 1,1 \div 2,1 \text{ Дж.}$$

Енергія, що витрачається безпосередньо на прискорення електронного пучка, дорівнює

$$W_n = U I_n \tau;$$

$$W_n = 5 \cdot 10^4 \cdot 10^3 (160 \div 300) \cdot 10^{-9} = 8 \div 15 \text{ Дж,}$$

де I_n – амплітудне значення струму пучка:

$$I_n = 1 \text{ кА.}$$

Енергетичну ефективність, або коефіцієнт корисної дії (ККД) індукційної системи, розраховуємо за формулою

$$\eta = \frac{W_n}{W + W_n} = \frac{I_n}{I_B + 0,5 I_\mu + I_n};$$

$$\eta = \frac{10^3}{23 + 0,5 \cdot 216,5 + 10^3} =$$

$$= \frac{10^3}{1239,5} = 0,807 \cdot 100 = 80,7 \%.$$

Після уточнення реальних втрат енергії в осердях на перемагнічування при робочих частотах до 10 МГц дійсний ККД може виявитися значно меншим, а саме, бути в межах $\eta = 50 - 80 \%$.

Складові імпульсних струмів та ККД, що характеризують окремий індуктор мають такі значення:

Струм електронного пучка (вторинний струм) I_{II} , кА.....	1
Вихровий струм у первинній обмотці I_B , А.....	32
Струм перемагнічування I_{II} , А.....	216,5
ККД індукційної системи η , %.....	75÷80

До головних енергетичних параметрів прискорювача належать:

Енергія електронного пучка, МеВ.....	2
Середня потужність пучка на виході P_{OUT} , кВт.....	50

Кількість феромагнітних осердь (або індукторів) в одному каналі розраховують за формулою

$$N = \frac{E_K}{U}; \quad N = \frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^4} = 40,$$

на обох каналах:

$$N_2 = 2N; \quad N_2 = 2 \cdot 40 = 80.$$

Загальна маса феромагнітного матеріалу для 80 осердь залежно від обраного зовнішнього діаметра буде в межах

$$M = 80(14,7 \div 44,5) = 1176 \div 3560 \text{ кг.}$$

Для обраного ефективного діаметра 0,4 м загальна маса матеріалу осердь

$$M \approx 2000 \text{ кг.}$$

Для оцінки потужності, що проходить через один індуктор, використовуємо формули:

– імпульсної потужності, що споживається на вторинному боці індуктора:

$$P = UI_{II};$$

$$P = 50 \cdot 10^3 \cdot 10^3 = 5 \cdot 10^7 \text{ Вт} = 50 \text{ МВт};$$

– імпульсної потужності, що споживається первинною обмоткою одного індуктора:

$$P_c = UI_c;$$

$$P_c = 5 \cdot 10^4 \cdot 1,3 \cdot 10^3 = 6,5 \cdot 10^7 \text{ Вт} = 65 \text{ МВт};$$

– середньої потужності, що має розвиватися на виході кожного індуктора:

$$\bar{P}_2 = \frac{P_{OUT}}{N};$$

$$\bar{P}_2 = \frac{50 \cdot 10^3}{80} = 625 \text{ Вт};$$

– середньої потужності, що підводиться до первинної обмотки індуктора для ККД 77%:

$$\bar{P}_1 = P_1 / \eta; \quad \bar{P}_1 = \frac{625}{0,77} = 812 \text{ Вт.}$$

Частоту повторення імпульсів f визначимо із співвідношення між середньою та імпульсною потужністю:

$$\bar{P}_2 = P_2 \tau f.$$

Звідси для тривалості робочого імпульсу напруги 150...300 нс одержуємо

$$f = \frac{\bar{P}_2}{P_2 \tau};$$

$$f = \frac{625}{5 \cdot 10^7 (150 \div 300) 10^{-9}} = 42 \dots 83 \text{ Гц.}$$

Беручи до уваги неоднорідний характер струму електронного пучка, реальний спад напруги на вершині імпульсу та інші невраховані втрати, вважаємо, що частота імпульсів для досягнення необхідної середньої потужності має бути дещо більшою, наприклад:

$$f = 50 \dots 100 \text{ Гц.}$$

Якщо індуктори будуть живитися імпульсами скороченої тривалості, які мають, наприклад,

$$\tau = 100 \dots 150 \text{ нс,}$$

тоді частоту повторення імпульсів необхідно збільшити до 80...125 Гц.

Висновки

Запропонована методика розрахунку головних показників індукторної системи прискорювача електронів базується на простих енергетичних співвідношеннях і дає можливість узгодити електричні та масогабаритні параметри індукторів із заданою вихідною потужністю.

Перевагою цієї методики є її простота, оскільки вона не передбачає розв'язання інтегральних або диференціальних рівнянь.

Для розрахунку основних параметрів індукторної системи достатньо мати дані параметрів матеріалу осердя та задати характеристики імпульсу напруги живлення і вихідну енергію пучка.

Література

1. Вахрушин Ю.В., Анацкий А.И. Линейные индукционные ускорители. – М.: Атомиздат, 1978. – 248 с.
2. Букаев П.В., Анацкий А.И., Хальчицкий Е.П. Расчет и исследование характеристик сердечников и индукторов ЛИУ// Электрофизическая аппаратура. – М.: Атомиздат, 1969. – Вып. 8. – С. 134–150.
3. Букаев П.В., Саранцев В.П. К вопросу о расчете полей, входного сопротивления, токов и напряжений в индукторах линейного индукционного ускорителя. – 1970. – 41 с. – Препринт / НИИЭФА; Р9 – 5129.
4. Букаев П.В. Исследование и расчет индукционной и импульсной систем линейного индукционного ускорителя электронов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Спец.: 05.280 – электрофизические установки и ускорители. – Л.: НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, 1971. – 16 с.

Стаття надійшла до редакції 12.12.06.