

Силовая электроника

УДК 621.314

Ю.В. Руденко¹, канд. техн. наук, **Т.В. Руденко**², канд. техн. наук

¹Институт электродинамики Национальной Академии Наук Украины,
пр. Победы 56, г. Киев, 03057, Украина.

²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический Институт»,
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Взаимосвязь нестабильности тока электромагнитной системы и ускоряющего напряжения электронно-лучевой пушки технологического оборудования

Рассмотрена взаимосвязь параметров источников электропитания электронно-лучевой пушки, обеспечивающая необходимую зависимость фокусировки и отклонения луча при изменении ускоряющего напряжения. Получены аналитические соотношения, позволяющие рассчитать допустимую нестабильность ускоряющего напряжения и максимальное напряжение на секции на примере использования высоковольтного секционированного источника питания и импульсного регулятора тока при заданной нестабильности тока электромагнитной системы. Библ.7, рис.3.

Ключевые слова: электронно-лучевая пушка; нестабильность тока системы фокусировки и отклонения; нестабильность ускоряющего напряжения.

Введение

Одной из основных задач, решаемых при построении электронно-лучевых пушек, является обеспечение стабильности параметров технологического процесса, осуществляемого с помощью электронно-лучевого оборудования [3-6]. Так, для обеспечения стабильности параметров проплавления при электронно-лучевой сварке, необходимо добиться стабильности удельной мощности в пучке на изделии при общей постоянной мощности пучка [6]. Удельная мощность в пучке на изделии зависит от фокусного расстояния, задающегося фокусирующей электромагнитной системой. В свою очередь, фокусное расстояние фокусирующей линзы зависит от ускоряющего напряжения. Поэтому колебания ускоряющего напряжения приводят к изменению диаметра пучка, а следовательно, и удельной мощности в пучке в плоскости изделия, ввиду чего колеблется величина глубины проплавления. Аналогично меняется плотность мощности в пучке на изделии вследствие коле-

бания тока магнитной линзы при постоянном ускоряющем напряжении. Та же проблема касается стабильности параметров отклоняющей системы. Угол отклонения пучка при постоянном токе отклоняющей катушки зависит от ускоряющего напряжения. Поэтому при изменении ускоряющего напряжения относительно заданного значения в процессе сварки электронный луч может смещаться относительно границ изделия.

Таким образом, при построении источников электропитания для электронно-лучевых пушек необходимым является соблюдение определенного соответствия между допустимой нестабильностью ускоряющего напряжения и требуемой нестабильностью токов фокусирующей и отклоняющей систем. Соотношения между допустимыми изменениями ускоряющего напряжения и токов фокусирующей и отклоняющей катушек являются широко известными [5,6]. Однако соотношения между допустимыми величинами нестабильности указанных параметров зависят от конкретного типа электронно-лучевой пушки и требуют дополнительного исследования.

Целью данной работы является определение взаимосвязи между параметрами ускоряющего напряжения и тока электромагнитной катушки обеспечивающей стабильность технологического процесса, при использовании секционированного источника напряжения [7] и регулятора тока [1].

Предложенный в работе [7] секционированный источник питания предназначен для использования в качестве источника ускоряющего напряжения и содержит N секций на вторичной стороне силового трансформатора, соединенных последовательно по выходу (рис.1).

Каждая секция источника содержит выпрямитель и токоограничивающий регулятор на основе импульсного преобразователя понижаю-

щего типа. В стационарном режиме работы источника все регуляторы работают в открытом состоянии - транзисторы регуляторов открыты. В число N секций входит сумма n нерегулируемых секций, в которых регуляторы находятся в открытом состоянии постоянно в стационарном режиме, и m регулировочных секций, которые могут находиться в открытом или закрытом состоянии для регулирования суммарного выходного напряжения. При нестабильности входного напряжения подключением или отключением регулировочных секций можно добиться заданной нестабильности выходного напряжения источника питания. В работе [2] показано, что заданную нестабильность выходного напряжения можно обеспечить выбором необходимого числа m регулировочных секций, для которого должна соответствовать определенная величина напряжения на выходе секции U_c . Таким образом, данный источник напряжения позволяет не только использовать относительно низковольтную элементную базу в узлах, но также регулировать выходное напряжение. Для определения необходимого числа секций и величины напряжения на них, обеспечивающих допустимую нестабильность выходного напряжения рассматриваемого источника питания, проанализируем условие между изменением величины ускоряющего напряжения U_y и током фокусирующей или отклоняющей катушки I_k , которое обеспечивает оптимальную фокусировку или отклонение [5,6]:

$$I_k = K_{\Pi} \sqrt{U_y}, \quad (1)$$

где K_{Π} - коэффициент пропорциональности, определяющий свойства электронно-лучевой пушки.

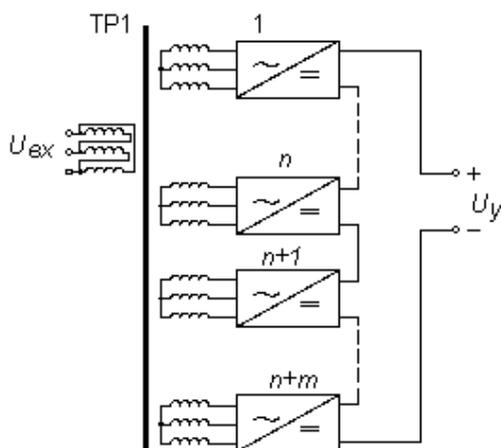


Рис.1. Секционированный источник питания

В работе [6] приведены экспериментально полученные зависимости оптимального тока фокусировки от ускоряющего напряжения при различных фокусных расстояниях для пушки У-250А - 130мм, 170мм, 210мм (кривые 1 – 3 соответственно) (рис.2).

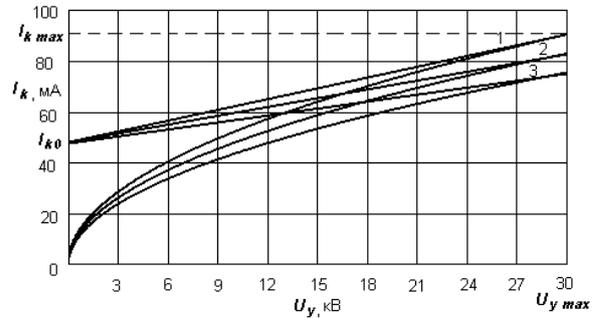


Рис. 2. Зависимости тока фокусировки от ускоряющего напряжения для электронно-лучевой пушки У-250А

Так же как и в работе [6], используем линейную аппроксимацию приведенных функций отрезками прямых в рабочем диапазоне ускоряющих напряжений (25 - 30кВ). Таким образом, от нелинейной зависимости (1) для определенного диапазона ускоряющих напряжений и заданного фокусного расстояния можно перейти к линейной зависимости с характерными параметрами: I_{kmax} - максимальный ток катушки при максимальном ускоряющем напряжении U_{ymax} , I_{k0} - опорный ток катушки при $U_y=0$:

$$I_k = I_{k0} + \frac{I_{kmax} - I_{k0}}{U_{ymax}} U_y. \quad (2)$$

Для реализации указанной зависимости можно использовать регулятор тока магнитных катушек на основе высокочастотного импульсного регулятора с трехконтурной системой управления (рис.3) [1]. Специфический характер нагрузки такого регулятора (высокие значения индуктивности магнитных катушек) обуславливает необходимость рассматривать такой преобразователь как звено третьего порядка, где вместе с реактивными элементами LCD-фильтра присутствует индуктивность нагрузки L_k . Поэтому для обеспечения высокой точности стабилизации выходного тока за счет увеличения коэффициента усиления в цепи обратной связи использованы дополнительные обратные связи по переменным состояниям каждого реактивного элемента. Это дает возможность ослабления влияния реактивных элементов на

суммарный фазовый сдвиг системы авторегулирования.

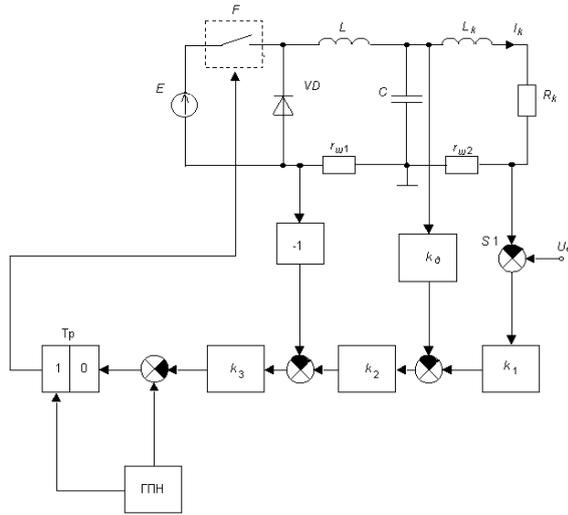


Рис. 3. Регулятор тока магнитных катушек

Регулировочная характеристика данного регулятора представляется зависимостью

$$I_k = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4AU_e}}{2A}, \quad (3)$$

где $A = \frac{R_k^2 r_{\theta} 2T}{2LEk_1 k_2}$,

$$B = r_{\omega 1} + \frac{R_k k_{\theta}}{k_1} + \frac{r_{\omega 2}}{k_1 k_2} + \frac{R_k T r_{\omega 2}}{2Lk_1 k_2} + \frac{2U_m R_k}{k_1 k_2 k_3 E},$$

T – период рабочей частоты регулятора; R_k – активное сопротивление обмотки катушки; L_k – индуктивность катушки; U_e – эталонное значение, задающее величину тока нагрузки регулятора.

Функция (3) представляет собой практически линейную зависимость при малых рабочих значениях эталонного напряжения U_e , изменяющуюся от нуля до расчетного значения. Ее производную $I'_k = \frac{1}{\sqrt{B^2 - 4AU_e}}$ выразим постоянной

функцией в рабочем диапазоне изменения эталонного напряжения. Ее численное значение совпадает с величиной I'_k в точке $U_e=0$. Поэтому можем записать $I'_k = 1/B$ и далее $I_k = U_e/B$, что соответствует линеаризованной регулировочной характеристике регулятора.

Для получения регулировочной характеристики, реализующей закон управления током катушки при изменении ускоряющего напряжения регулятора тока согласно выражению (2), введем постоянную составляющую U_{e0} в сигнал эталонного напряжения с помощью сумматора

напряжений в схеме управления регулятором. Тогда выражение для регулировочной характеристики регулятора примет вид

$$I_k = \frac{U_e + U_{e0}}{B}, \quad (4)$$

где $U_{e0} = \frac{K_{\theta} U_{y \max} I_{k0}}{I_{k \max} - I_{k0}}$, $K_{\theta} = \frac{U_e}{U_y}$.

Очевидно после решения выражения (4) относительно B при $U_e=0$ когда $I_k(0)=I_{k0}$, что для реализации заданной характеристики (2) необходимо, чтобы параметр B соответствовал следующему соотношению

$$B = \frac{K_{\theta} U_{y \max}}{I_{k \max} - I_{k0}}. \quad (5)$$

Таким образом, определяя параметр B по выражению (5) в соответствии с требованиями по регулированию тока согласно заданной характеристики для конкретного типа пушки (рис.2), можно затем определить требуемые параметры системы управления регулятора тока, пользуясь определением B в соотношении (3).

Перейдем к определению параметров неустойчивости ускоряющего напряжения и тока катушки. Неустойчивость ускоряющего напряжения δ_u относительно номинального значения $U_{уном}$ определим как

$$\delta_u = \frac{U_{y \max} - U_{уном}}{U_{уном}} = \frac{U_{уном} - U_{y \min}}{U_{уном}}, \quad (6)$$

где $U_{y \max}$, $U_{y \min}$ – соответственно максимальное и минимальное значение ускоряющего напряжения.

Аналогично для неустойчивости тока катушки относительно номинального значения $I_{кном}$:

$$\delta_i = \frac{I_{k \max} - I_{кном}}{I_{кном}} = \frac{I_{кном} - I_{k \min}}{I_{кном}}, \quad (7)$$

где $I_{k \max}$, $I_{k \min}$ – соответственно максимальное и минимальное значение тока катушки.

Обозначим разность между максимальным и минимальным значением ускоряющего напряжения $\Delta U_y = U_{y \max} - U_{y \min}$ как максимальное напряжение на регулировочной секции рассматриваемого секционированного источника $U_{c \max} = \Delta U_y$, которое определяет неустойчивость выходного напряжения δ_u . Исходя из выражения (4) с учетом линейности функции $I_k(U_e)$ можем записать $K_{\theta} \Delta U_y = B \Delta I_k$, где величина $\Delta I_k = I_{k \max} - I_{k \min}$ определяет неустойчивость тока катушки относительно его номинального

значения (7), причем $\Delta I_k = 2\delta_i I_{кНОМ}$. Поэтому можно записать:

$$\Delta U_y = \frac{2\delta_i I_{кНОМ} B}{K_\delta}. \quad (8)$$

Данное выражение определяет максимальное значение на регулировочной секции $U_{сmax}$ источника питания, которое необходимо обеспечить при требуемой нестабильности тока катушки δ_i , заданных характеристиках пушки (5), заданном рабочем режиме $I_{кНОМ}$.

В нормированном виде имеем:

$$U_{сmax}^* = \frac{\Delta U_y}{U_{уНОМ}} = 2\delta_u. \quad (9)$$

Подставляя в выражение (9) уравнение (8), получим:

$$U_{сmax}^* = \frac{2\delta_i I_{кНОМ} B}{K_\delta U_{уНОМ}}. \quad (10)$$

Тогда нестабильность ускоряющего напряжения определится следующим образом:

$$\delta_u = \frac{1}{2} U_{сmax}^* = \frac{\delta_i I_{кНОМ} B}{K_\delta U_{уНОМ}}. \quad (11)$$

Полученное выражение (11) определяет требуемую связь нестабильности ускоряющего напряжения и тока магнитной катушки в соответствии с оптимальной закономерностью (1).

Используя полученное значение нестабильности ускоряющего напряжения можно определить требуемое число n нерегулируемых секций с величиной напряжения, определяемой выражением (10):

$$n = \frac{1 + \delta_u}{2\delta_u}. \quad (12)$$

Необходимое число m регулировочных секций, определяемое требуемой шириной зоны стабилизации ускоряющего напряжения при изменении напряжения питающей сети U_{ex} , получим в таком виде [2]:

$$m = G(n - 1) - n, \quad (13)$$

где $G = U_{exmax}/U_{exmin}$ - глубина диапазона стабилизации, U_{exmax} , U_{exmin} - максимальное и минимальное значение входного напряжения источника.

Определить необходимое число регулировочных секций m можно также независимо от количества нерегулируемых секций n , используя параметры заданной зоны стабилизации:

$$\frac{(G - g)}{g(g - 1)} \leq m \leq \frac{2g(G - g)}{G(g - 1)}, \quad (14)$$

где $g = U_{ymax}/U_{ymin} = (1 + \delta_u)/(1 - \delta_u)$.

В таком случае максимальное напряжение на секции должно соответствовать выражению:

$$U_{сmax}^* = \frac{2(G - g)}{m(g + 1)}. \quad (15)$$

Подставляя в выражении (15) соотношение (11) в обозначение коэффициента g , получим зависимость требуемого значения максимального напряжения на секции от заданной величины нестабильности тока магнитной катушки

$$U_{сmax}^* = \frac{1}{m} [G(1 - \alpha\delta_i) - (1 + \alpha\delta_i)], \quad (16)$$

где $\alpha = I_{кНОМ} B / k_\delta U_{уНОМ}$

Зависимость (16) обеспечивает выполнение условия необходимой фокусировки или отклонения луча в пушке в соответствии с требованием (1) в заданном диапазоне стабилизации G секционированного источника ускоряющего напряжения.

Выводы

1. Проведенный анализ показал, что для соблюдения условия оптимального управления лучом в электронно-лучевой пушке в рабочих диапазонах изменения ускоряющего напряжения отношение величин нестабильности δ_u/δ_i допустимо экстраполировать постоянным коэффициентом α , определяемым рабочими характеристиками режимов.

2. Сформулировано требование к величине нестабильности ускоряющего напряжения при заданной нестабильности тока катушки, обеспечивающее сохранение стабильности технологического процесса.

3. Сформулировано требование к допустимой величине максимального напряжения на секции секционированного источника, которое обеспечивает заданную нестабильность тока магнитной катушки и не вызывает нарушения стабильности технологического процесса в заданном диапазоне стабилизации ускоряющего напряжения.

Список использованных источников

1. Комаров Н.С., Руденко Ю.В. Регулировочные характеристики источника тока для питания магнитных катушек вакуумных технологических установок // Технічна електродинаміка. - 2002. - №2. - С.19 – 24.
2. Липковский К.А., Руденко Ю.В. Режимы стабилизации выходного напряжения в секцио-

- нированих системах електропитання // Праці Інституту електродинаміки НАНУ: зб. наук. праць. – Київ: ІЕД НАНУ, 2010. – Вип.27. – С.97 – 100.
3. Рубцов В.П., Щербаків А.В. Аналіз динамічних характеристик каналу відхилення луча в електронно-лучевій установці // Електротехніка. – 2014. – №2. – С.30 – 34.
 4. Рыкалін Н.Н., Зуєв І.В., Углов А.А. Основи електронно-лучеві обробки матеріалів. – М.: Машинобудування, 1978. – 239с.
 5. Назаренко О.К. Схемотехніка управління током пучки електронів. – Київ: ІЕЗ ім. Я.О.Патона НАНУ, 2013. – 56с.
 6. Четртько А.І., Назаренко О.К., Святський А.М., Некрасов А.І. Обладнання для електронно-лучеві зварки. – Київ: Наукова думка, 1973. – 408с.
 7. Пат. 85316 UA, МПК H02M 7/10 Високовольтне джерело живлення для електронно-променевої обладнання / М.С.Комаров, Ю.В.Руденко. Опубл. 12.01.2009. Бюл. №1

Поступила в редакцію 30 юня 2015 г

УДК 621.314

Ю.В. Руденко¹, канд. техн. наук, **Т.В. Руденко²**, канд. техн. наук

¹Інститут електродинаміки Національної Академії Наук України, пр. Перемоги 56, м. Київ, 03057, Україна.

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний Інститут», вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

Взаємозв'язок нестабільності струму електромагнітної системи та прискорюючої напруги електронно-променевої гармати технологічного обладнання

Розглянуто взаємозв'язок параметрів джерел електроживлення електронно-променевої гармати, який забезпечує умову необхідного фокусування та відхилення променя при зміні прискорюючої напруги. При аналізі заданого оптимального співвідношення між струмом котушки електромагнітної системи та прискорюючою напругою у вигляді нелінійної функції для визначеного типу пушки використана лінійна апроксимація цієї функції в робочому діапазоні прискорюючих напруг. Дослідження проведені з використанням імпульсного регулятора струму для живлення котушок та високовольтного секціонованого перетворювача в якості джерела прискорюючої напруги. Для отримання регульованої характеристики згідно заданого оптимального закону керування струмом котушки в залежності від прискорюючої напруги у вхідний сигнал еталонної напруги регулятору введено постійну складову. Це дозволило отримати аналітичні співвідношення для розрахунку припустимої нестабільності прискорюючої напруги та максимальної напруги на секції джерела прискорюючої напруги при заданій нестабільності струму електромагнітної системи та заданих технічних параметрах гармати. Бібл. 7, рис. 3.

Ключові слова: електронно-променева гармата; нестабільність струму системи фокусування та відхилення; нестабільність прискорюючої напруги.

UDC 621.314

Yu. Rudenko¹, Ph.D., **T. Rudenko**², Ph.D.

¹Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Pr. Peremogy 56, Kiev, 03057, Ukraine.

²National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
Str. Polytechnique, 16, a house 12, Kiev, 03056, Ukraine.

Relation of instability of electric magnetic system current and accelerating voltage at the electron-beam gun

Relation of power supplies parameters at electron beam gun is considered which provides the condition of needed beam focusing and deflection with accelerating voltage variation. During analysis of set optimum proportion between electric magnetic system coil current and accelerating voltage as non-linear function for specified gun type the linear approximation of this function at operation range of accelerating voltage is used. Investigations are conducted with application of pulse current regulator for supplying of coils and high voltage sectioned converter as accelerating voltage source.

In order to obtain the regulating characteristic in accordance with set optimum coil current control law in dependence with accelerating voltage the constant component is put to input signal of etalon voltage. It allowed to obtain the analytic relationships for calculation of the accelerating voltage acceptable instability and section maximum voltage at accelerating voltage source with set instability of electric magnetic system current and set technical parameters of the gun. Refer. 7, Fig. 3.

Keywords: *electron-beam gun; current instability of focusing and deflection system; accelerating voltage instability.*

References

1. Komarov, N. S., Rudenko, Yu. V. (2002). Current source regulating characteristics for supplying of magnetic coil at vacuum technological installations. *Tekhnichna Elektrodynamika*. No2. Pp.19-24. (Rus)
2. Lipkovskiy, K. A., Rudenko, Yu. V. (2010). Stabilizing regimes of output voltage at sectioned power supplies. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Vypusk 27. Pp.97 – 100. (Rus)
3. Rubtsov, V. P., Scherbakov, A. V. (2014). Dynamic Characteristics Analysis of Beam Deflection Channel at Electron-Beam Installation. *Electrotekhnika*. No. 2. Pp.30-34. (Rus)
4. Rykalin, N. N., Zuyev, I. V., Uglov, A. A. (1978). *Basis of Electron-Beam Material Processing*. Mashinostroenie. P. 239. (Rus)
5. Nazarenko, O. K. (2013). *Circuit Technique of Electron Bunch Current Control*. Kyiv: Instytut Elektrovaryuvannya imeni E.O. Patona Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, P. 56. (Rus)
6. Chvertko, A. I., Nazarenko, O. K., Svyatskiy, A. M., Nekrasov, A. I. (1973). *Equipment for Electron-Beam Welding*. Kyiv: Naukova Dumka, P. 408. (Rus)
7. Komarov, N. S., Rudenko, Yu. V. (2009). *High Voltage Power Supply for Electron-Beam Equipment*. Patent UA # 85316. (Ukr)