

В.В.Мартынов, канд.техн.наук, **Б.Б.Лебедев**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.
e-mail:mart_v@ied.org.ua

Рассмотрены вопросы накопления энергии в ёмкостях высоковольтной цепи импульсного источника ускоряющего напряжения нерезонансного типа. Показана взаимосвязь между величиной пульсаций выходного напряжения, сопротивления нагрузки, ёмкости фильтра и индуктивностью рассеяния многообмоточного трансформатора. Предложены аналитические выражения, позволяющие рассчитывать выходные параметры многосекционного преобразователя напряжения прямоугольной формы исходя из величин элементов секции и числа секций. На примере источника напряжением 60 кВ и мощностью 18 кВт показано, что на частоте преобразования 20 кГц и пульсациях менее 2% энергоёмкость выходной цепи не превышает 7 Дж, из которых примерно половина приходится на энергию ёмкости кабеля. Библ. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: источник ускоряющего напряжения, импульсный преобразователь, многообмоточный трансформатор, индуктивность рассеяния, электронно-лучевое технологическое оборудование.

Введение. Источники ускоряющего напряжения (ИУН) в установках электронно-лучевой сварки выполняют несколько важнейших функций: придают электронному лучу (пучку) энергию, необходимую для осуществления технологии сварки, и защищают электронно-лучевую пушку, ее электроды и саму мишень (обрабатываемую деталь) от негативных последствий высоковольтных пробоев, возникающих при этой технологии. В настоящее время широко применяют низкочастотные ИУН, выполненные на основе низкочастотного трехфазного трансформатора. Примеры исполнения и технические параметры ряда ИУН с диапазоном ускоряющих высоких напряжений (ВН) 30–120 кВ и выходной мощностью 15–120 кВт для сварочных установок приведены в [2]. Необходимая стабильность ВН, высокие электрические и динамические показатели достигаются у низкочастотных ИУН за счет специальной электронной лампы, рассчитанной на полное ускоряющее напряжение, например, ПП-2 [2, 3]. Однако такое построение ИУН, кроме больших габаритов и массы, требует специальных мер по отводу тепла от электронной лампы.

Альтернативными решениями являются ИУН на основе высокочастотных импульсных преобразователей [1, 7, 9, 10]. Благодаря высокой частоте преобразования, обычно 10–30 кГц, эти преобразователи имеют малые габариты, меньшие постоянные времени и хорошие динамические характеристики при переходных процессах. С их помощью защита от пробоев может обеспечиваться без применения специальных высоковольтных электронных ламп.

Энергоёмкость выходной цепи источника высокого напряжения определяется совокупностью энергий, накапливаемых в её реактивных элементах в рабочих или переходных режимах. При пробоях в выходной цепи ИУН накопленная энергия высвобождается и может приводить к отказам элементов или к появлению технологических дефектов в сварном шве. Вопросы энергоёмкости ИУН в научно-технической литературе освещены недостаточно, что потребовало проведения дополнительных исследований.

Цель статьи состоит в определении энергии, запасаемой в электрическом поле ёмкостей выходной цепи импульсного источника ускоряющего напряжения для сварочной электронно-лучевой установки.

Для выявления составляющих накопленной энергии рассмотрим упрощенную схему устройства электропитания сварочной электронно-лучевой установки [2] на рис. 1, где показаны ИУН, блок питания электронной пушки (БПП), кабель высоковольтный (КБВ) и электронно-лучевая установка (ЭЛУ) с эмиссионной системой – электронной пушкой (ЭП).

Источник ускоряющего напряжения ИУН образован силовым инвертором (СИ), формирующим двухполярные импульсы прямоугольной формы с частотой следования 20 кГц и регулируемой амплитудой, и высоковольтным преобразователем напряжения (ВП). Основу ВП составляет многообмоточный трансформатор Т1 с ячейками Я1...ЯN, которые объединены в единую многосекционную конструкцию. Каждая ячейка, например Я1, представляет собой выпрямитель на диодах D1...D4 с конденсатором фильтра Cf, служащим для ослабления пульсаций выпрямленного напряжения.

БПП содержит три импульсных высокочастотных устройства для питания постоянным током электродов ЭП: И1, Т1, В1 – напряжением бомбардировки катода (К); И2, Т2, В2 – током накала катода (НК); И3, Т3, В3 – напряжением смещения для управляющего электрода (УЭ). Инверторы И1–И3 находятся на стороне низкого потенциала и генерируют двухполярные импульсы прямоугольной формы, которые через изолирующие трансформаторы Т1–Т3 поступают к выпрямителям В1–В3, находящимся на стороне высокого потенциала.

В описанной схеме можно выделить три группы ёмкостных накопителей энергии, подключенных к ускоряющему напряжению U_a выходной высоковольтной цепи ВП, как показано на эквивалентной схеме рис. 2. Первая группа образована последовательной цепочкой конденсаторов фильтров ячеек ВП $C_{f1} \dots C_{fN}$, вторая – параллельным соединением ёмкостей изоляции развязывающих трансформаторов $C_{it1} \dots C_{it3}$, а третья – распределённой ёмкостью высоковольтного кабеля КВВ. Последняя показана на рис. 2 в виде сосредоточенной ёмкости C_{cab} . Рассмотрим энергию электрического поля, накапливаемую в ёмкостях каждой группы.

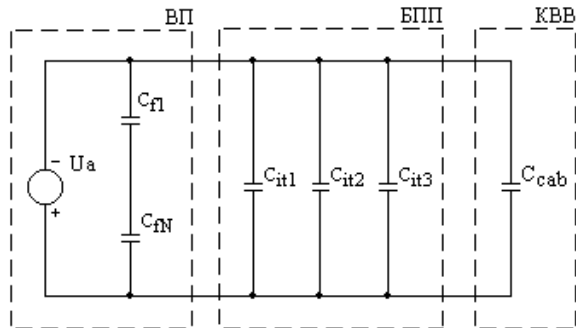


Рис. 2

Энергию, накопленную в электрическом поле конденсаторов фильтра многоячеечного высоковольтного преобразователя, можно определить из выражения

$$W_{fe} = 0,5 C_{fe} U_a^2 = 0,5 C_f U_c^2 N. \quad (1)$$

Выходное напряжение ячейки и число ячеек конкретного высоковольтного преобразователя являются константами и для расчета накопленной энергии в них достаточно определить только ёмкость конденсатора фильтра. Одним из критериев выбора ёмкости фильтра может служить характеристика качества выходного напряжения ячейки – его пульсации. Ниже используются приведённые относительные пульсации, равные отношению разности амплитуд наибольшего U_{amax} и наименьшего U_{amin} значений ускоряющего напряжения (от пика до пика) к его наибольшему значению (их часто указывают в процентах)

$$\delta_a = (U_{amax} - U_{amin}) / U_{amax}. \quad (2)$$

Ток нагрузки сварочных установок имеет вид импульсов, амплитуда которых может изменяться в широких пределах с частотой в единицы килогерц. А так как использование LC-фильтров при

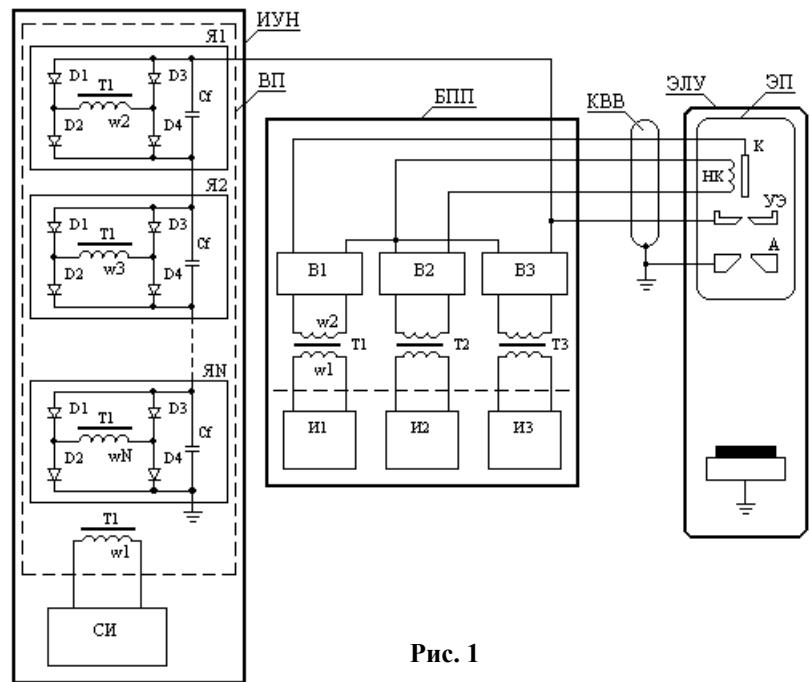


Рис. 1

импульсном и прерывистом токе нагрузки чревато возникновением нежелательных перенапряжений, то на выходе выпрямителя высоковольтного преобразователя используют только ёмкостный фильтр.

Благодаря тому, что выходы ячеек соединены последовательно, высокое ускоряющее напряжение ВП равно сумме выходных напряжений всех ячеек. Поэтому вторичные обмотки трансформатора и элементы ячеек находятся под разными потенциалами постоянного тока относительно друг друга. Для обеспечения их развязки по высокому напряжению многообмоточный трансформатор высоковольтного преобразователя выполняют с изоляционными зазорами как между обмотками, так и между элементами его конструкции. Вследствие этого такой трансформатор имеет повышенную индуктивность рассеяния, значительно большую, чем у низковольтных трансформаторов, что помимо увеличения реактивной энергии, циркулирующей между инвертором и высоковольтным преобразователем, существенно влияет на уровень пульсаций выходного напряжения ячеек.

С целью выявления величин, влияющих на уровень пульсаций выходного напряжения высоковольтного преобразователя, исследуем электромагнитные процессы в одной его ячейке, упрощенная схема которой показана на рис. 3. Схема содержит источник E двухполярных импульсов, индуктивность рассеяния L_s , мостовой выпрямитель на диодах $D1...D4$, а также конденсатор фильтра ёмкостью C и резистор нагрузки сопротивлением R .

На рис. 4 показаны эпюры напряжения и тока схемы рис. 3 для случая, когда конденсатор фильтра отсутствует, т.е. $C=0$, и сопротивление нагрузки значительно больше сопротивления индуктивности рассеяния на частоте преобразования. Если импульсы напряжения источника E имеют прямоугольную форму с амплитудой U_m , то импульсы тока I_{Ls} , протекающего через индуктивность рассеяния, имеют характерное "затягивание" фронта и среза. С момента изменения полярности напряжения источника E напряжение $U_{вых}$ на сопротивлении нагрузки R падает до нуля в течение времени t_1 , а затем поднимается от нуля до амплитудного значения на интервале t_2 . Это приводит к тому, что в выходном напряжении $U_{вых}$ ячейки, показанном на нижнем графике рис. 3, образуются провалы напряжения пилообразной формы. В таких режимах пульсации выходного напряжения могут достигать 100%. Установка конденсатора фильтра C на выходе выпрямителя позволяет получить сглаженное выходное напряжение $U_{вых}$, показанное пунктиром на диаграмме рис. 4.

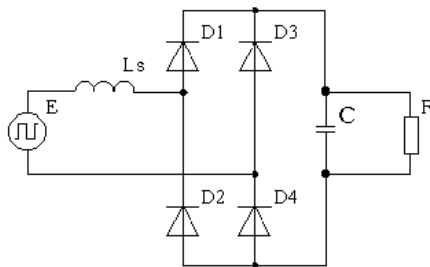


Рис. 3

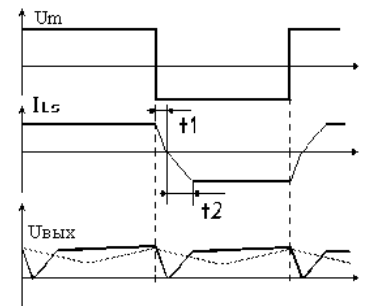


Рис. 4

Для вывода соотношений величины пульсаций и параметров схемы ячейки воспользуемся операторным методом. Считая источник и элементы схемы рис. 3 идеальными, процесс выпрямления каждого полупериода импульсного напряжения можно разделить на две стадии, представленные эквивалентными схемами рис. 5. На первой стадии (рис. 5, а) к индуктивности рассеяния L_s приложена сумма входного напряжения E и напряжения на конденсаторе U_c . Ток I_1 через индуктивность L_s изменяется от амплитудного значения до нуля за очень малое время в сравнении с длительностью полупериода входного напряжения. Поэтому изменением напряжения на конденсаторе фильтра на первой стадии можно пренебречь и считать, что пульсации напряжения на нём определяются процессами, происходящими в продолжительность только второй стадии.

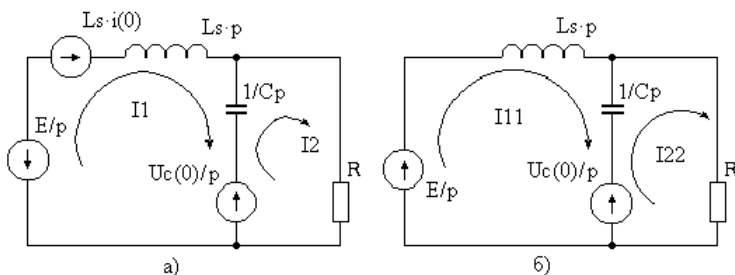


Рис. 5

Для второй стадии рис. 5, б имеем следующие изображения для токов:

$$i_L = (E/p - U_c)(pL_s)^{-1}, \quad i_R = U_c i_L / R, \quad i_C = pC(U_c - E/p).$$

По первому закону Киргофа $i_L = i_R + i_C$. Отсюда по второму закону Киргофа

$$(E/p - U_c)(pL_s)^{-1} = U_c/R + pC(U_c - E/p).$$

Решая это уравнение относительно U_c , получим для изображений

$$U_c = ER(1 + CL_s p) p^{-1} (R + pL_s + p^2 CL_s R)^{-1}.$$

Переходя от изображений к оригиналам, получим выражение для мгновенного значения напряжения на емкости

$$U_c(t) = E \left(1 - 2/\sqrt{4k^2 - 1} \cdot \exp(-t/2RC) \cdot \sin(t\sqrt{4k^2 - 1}/2RC) \right), \quad (3)$$

где $k = R/\rho$ – коэффициент отношения сопротивления нагрузки ячейки и волнового сопротивления контура, а $\rho = \sqrt{L_s/C}$ – волновое сопротивление контура, образованного ёмкостью фильтра и индуктивностью рассеяния.

В момент времени $t=0$ синусоидальная функция в выражении (3) становится равной нулю, амплитуды мгновенного напряжения на ёмкости и напряжения источника E становятся равными ($U_{cmax}=E$) и в силу этого напряжение на ёмкости фильтра достигает своего экстремального и наибольшего значения.

Второй экстремум функция $U_c(t)$ имеет при значении времени t , равном

$$t = 2RC \left(\sqrt{4k^2 - 1} \right)^{-1} \arctg \sqrt{4k^2 - 1}, \quad (4)$$

когда напряжение на конденсаторе фильтра принимает наименьшее значение

$$U_{cmin} = E \left(1 - k^{-1} \exp \left[- \left(\sqrt{4k^2 - 1} \right)^{-1} \arctg \sqrt{4k^2 - 1} \right] \right). \quad (5)$$

Подставляя в уравнение (2) выражения для экстремальных значений U_{cmin} и U_{cmax} , получим уравнение для приведённых относительных пульсаций δ_{Uc} напряжения на конденсаторе фильтра

$$\delta_{Uc} = (U_{cmax} - U_{cmin}) U_{cmax}^{-1} = k^{-1} \exp \left[- \left(\sqrt{4k^2 - 1} \right)^{-1} \arctg \sqrt{4k^2 - 1} \right]. \quad (6)$$

На рис. 6 показан график пульсаций δ_{Uc} в зависимости от переменной k . Если учесть, что пульсации ускоряющего напряжения электронно-лучевых сварочных установок δ_a допускаются стандартом ISO 14744-1:2008 на уровне не более 2% [8], то практически значимым пульсациям менее 2% на рис. 6 соответствует область значений переменной $k > 50$. Для этой области с достаточной точностью уравнение (6) сводится к выражению

$$\delta_{Uc} \approx k^{-1} = R^{-1} \sqrt{L_s/C}, \quad (7)$$

откуда получим простую формулу для расчета ёмкости конденсатора фильтра C_f ячейки импульсного ИУН для сварочных электронно-лучевых установок в виде

$$C_f = L_s / R^2 \delta_a^2, \quad (8)$$

где δ_a – заданные техническими условиями относительные пульсации ускоряющего напряжения.

Т.к. конденсаторы выпускаются с определённым шагом номинальных значений ёмкости, то для установки в схему выбирают конденсатор с ближайшим большим значением ёмкости.

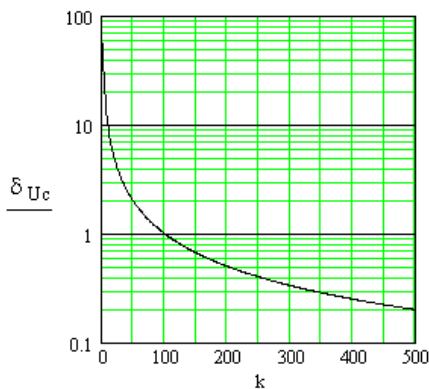


Рис. 6

Ёмкость высоковольтного кабеля. В работе [4] приведены характеристики и особенности применения нескольких типов высоковольтных кабелей, предназначенных для передачи энергии от ИУН к потребителю – сварочной электронно-лучевой установке. Зачастую, это кабели высоковольтные, коаксиальные, типа ЗКВЭЛ или 4КВЭЛ, разработанные специально для совместного применения с электронно-лучевыми установками на ускоряющие напряжения 60, 110 или 165 кВ. Они имеют погонную ёмкость высоковольтной изоляции 150 пФ/м [6]. Длина применяемого кабеля зависит от габаритов свариваемых изделий и может колебаться от 10 до 50 метров. Пропорционально длине изменяется и эквивалентная ёмкость изоляции кабеля. Для определённости ниже в таблице представлены результаты расчета

ёмкости C_c и накопленной в ней энергии для кабеля типа 4КВЭЛ-110 длиной 10 м.

Паразитная ёмкость блока питания электронной пушки. Блок питания электронной пушки, показанный на рис. 1, имеет в своём составе несколько узлов, которые находятся на стороне высокого потенциала. Гальваническая развязка по ускоряющему напряжению постоянного тока в перечисленных устройствах обеспечивается при помощи высокочастотного изолирующего трансформатора [5]. Изоляция между обмотками и элементами конструкции каждого из изолирующих трансформаторов выдерживает с необходимым запасом выходное напряжение ИУН. Так как выходная мощность изолирующего трансформатора не превышает 150 ватт, а тепловыделение его сердечника и обмоток незначительно, то главную изоляцию его высокопотенциальных обмоток относительно первичной обмотки выполняют в виде твёрдого диэлектрика – отверждённого эпоксидного компаунда, органического стекла или фторопласта. Измеренная межобмоточная паразитная ёмкость таких изолирующих трансформаторов, используемых в источнике питания электронной пушки комплексов типа ЭЛА [2], с твёрдой главной изоляцией в виде органического стекла не превышает $C_{it} = 10$ пФ. При ускоряющем напряжении $U_a = 60$ кВ накопленная в трёх трансформаторах энергия W_{it} составит 0,054 Дж, что на два порядка меньше энергоёмкости конденсаторов фильтра.

Баланс энергий. Полную энергию W_{Csum} , накопленную в выходной цепи ИУН, определим как сумму энергий, накопленных в ёмкостях конденсаторов фильтра W_{fe} , межобмоточных ёмкостях изолирующих трансформаторов БПП W_{it} и в паразитной ёмкости высоковольтного кабеля W_{cab}

$$W_{Csum} = W_{fe} + W_{it} + W_{cab} \quad (9)$$

В Институте электродинамики НАН Украины (г. Киев) разработан источник ускоряющего напряжения ИУН60-18 по схеме, аналогичной рис. 1, с параметрами выхода $U_a = 60$ кВ, $P_a = 18$ кВт, $I_a = 0,3$ А. Результаты расчетов параметров ячейки, эквивалентных параметров схемы ИУН и энергии, накопленной в его выходной цепи, сведены в таблице.

Параметры	Значение
U_a , кВ	60
I_a , мА	300
P_a , кВт	18
f_{in} , кГц	20
δ_a , %	< 2,0
U_c , кВ	500
R , кОм	1,6667
L_s , мкГн	175
ρ , Ом	33,333
$k=R/\rho$	50
C_f , мкФ	0,22
C_{fe} , пФ	1833
C_{it} , нФ	30
C_{cab} , пФ	1500
W_{fe} , Дж	3,3
W_{it} , Дж	0,054
Дж	3,42
W_{Csum} , Дж	6,774

Анализ таблицы показывает, что при длине кабеля до 10 м энергии, накапливаемые в ёмкостях конденсаторов фильтра высоковольтного преобразователя и в паразитной ёмкости высоковольтного кабеля, примерно равны. При большей длине кабеля энергия его ёмкости становится преобладающей.

Пути снижения энергии, накопленной в выходной цепи ИУН.

Из-за малости энергии изолирующих трансформаторов (таблица) в уравнении (9) остаются только две величины, изменение которых позволяет уменьшить полную энергию выходной цепи. Одна из них – энергия кабеля, может быть минимизирована за счет сокращения его длины, а другая – энергия эквивалентной ёмкости фильтра ВП – за счет снижения требуемой ёмкости фильтра ячейки, например, путём уменьшения индуктивности рассеяния обмоток многообмоточного трансформатора. Действительно, подставляя в уравнение (1) вместо ёмкости фильтра её выражение из (8), получим

$$W_{fe} = 0,5C_f U_c^2 N = 0,5L_s U_c^2 N R^{-2} \delta_a^{-2} \quad (10)$$

Учитывая, что индуктивность рассеяния обмоток трансформатора пропорциональна квадрату числа их витков, эта составляющая энергии ИУН может быть минимизирована, например, путём увеличения частоты преобразования, выбором материала магнитопровода с большим значением рабочей индукции, увеличением сечения магнитопровода или при сочетании перечисленных способов.

Выводы. Проанализированы составляющие полной энергии высоковольтной цепи установки для электронно-лучевой сварки. Установлено, что величина пульсаций ускоряющего напряжения высоковольтного преобразователя зависит от отношения сопротивления нагрузки ячейки и ёмкости конденсатора фильтра ячейки. Показано, что ёмкость фильтра ячейки пропорциональна индуктивности рассеяния вторичной обмотки многообмоточного трансформатора.

1. Мартынов В.В., Монжеран Ю.П., Можаровский А.Г., Лебедев Б.Б., Смитюк Г.Е., Чайка Н.В., Иванов А.М. Высоковольтный источник питания для электронно-лучевого нагрева // Современная электротехнология. – 2010. – №2. – С. 57–59.

2. Мощные электронно-лучевые сварочные установки // Каталог: Технологии, материалы, оборудование. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. – 2005. – 246 с. Доступен на сайте: www.ies.pdf

3. Назаренко О.К., Локшин В.Е. Динамические характеристики высоковольтных источников питания для электронно-лучевой сварки // Автоматическая сварка. – 2005. – № 1. – С. 36–38.

4. Назаренко О.К., Матвейчук В.А., Галушка В.В. Моделирование влияния высоковольтных кабелей на пульсации тока в сварочных пушках с автоматическим смещением // Автоматическая сварка. – 2011. – № 5. – С. 32–35.
5. Чайка Н.К. Блок смещения и питания катода электронно-лучевой сварочной пушки с использованием инверторных преобразователей // Автоматическая сварка. – 2007. – № 7. – С. 50–52.
6. *Электрические кабели, провода и шнуры*: Справочник / Н.И.Белоруссов, А.Е.Саакян, А.И.Яковлева. Под ред. Н.И.Белоруссова. 5-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
7. *High Voltage Generator model SR60-N-6.000-EBW. User's Guide*, Technix, France, 2003.
8. *ISO 14744-1:2008 Welding – Acceptance inspection of electron beam welding machines – Part 1: Principles and acceptance conditions.*
9. Komarov N., Podoltsev A., Kucheriavaia I., Lebedev B. High-Frequency High-Voltage DC Isolation Transformer-Rectifying Module for Power Supply of Technological Equipment // EPE Journal. – 2001. – Vol.11. – № 1. – Pp. 33–44.
10. Pat. USA 5,610,562. Mar, 11, 1997. Int.Cl⁶. - H02M 7/537, US CL. - 307/89. Daniel W. Shimer and Arnold C. Lange. E-Beam High Voltage Switching Power Supply.

УДК 621.314 + 621.791.72

ЕНЕРГІЯ У ВИХІДНОМУ ЛАНЦЮЗІ ДЖЕРЕЛА ПРИСКОРЮЮЧОЇ НАПРУГИ

В.В.Мартинів, канд.техн.наук, **Б.Б.Лебедев**

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. e-mail: mart_v@ied.org.ua

Розглянуто питання накопичення енергії в ємності високовольтного ланцюга імпульсного джерела прискорюючої напруги нерезонансного типу. Показано взаємозв'язок між величиною пульсацій випрямленої вихідної напруги, опору навантаження, ємністю фільтра і індуктивністю розсіяння багатообмотувального трансформатора. Запропоновано аналітичні вирази, що дозволяють розраховувати вихідні параметри багатосекційного перетворювача напруги прямокутної форми, виходячи з величин елементів секції та числа секцій. На прикладі джерела напругою 60 кВ потужністю 15 кВт показано, що на частоті перетворення 20 кГц і пульсаціях менше 2% енергоємність вихідного ланцюга зварювальної електронно-променевої установки не перевищує 7 Дж, з яких приблизно половина припадає на енергію ємності кабелів. Бібл. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: джерело прискорюючої напруги, високочастотний перетворювач, багатообмотувальний трансформатор, індуктивність розсіяння, електронно-променеве технологічне устаткування.

STORED OUTPUT ENERGY OF THE ACCELERATION VOLTAGE SOURCE

V.V.Martynov, B.B.Lebedev

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine. e-mail: mart_v@ied.org.ua

Problems of stored energy in high-voltage circuit capacities of the acceleration voltage switching source of nonresonance type are considered. The interrelation between value of the ripple output voltage, load resistance, capacitance filter and leakage inductance of multiwinding transformer are figured. Analytical calculations for output parameters of high-frequency multisectional square-wave voltage converters based on ratio between number and parameters of sections are suggested. By the example of source with 60kV voltage and 15 kW power for electron beam welding installation is shown that on transformation frequency 20 kHz and ripple less than 2% stored energy in output circuit does not exceed 7 J, hereof approximately half of it is stored energy in cable capacity. References 10, table 1, figures 6.

Keywords: acceleration voltage source, high-frequency switching power supply, multi-winding transformer, leakage inductance, the electron-beam equipment.

1. Martynov V.V., Monzheran Yu.P., Mozharovskii A.G., Lebedev B.B., Smetiuk G.E. Chaika N.W., Ivanov A.M. High Voltage Supply for E-Beam Heating // *Sovremennaja elektrometallurgija*. – 2010. – №2. – Pp. 57–59. (Rus)

2. *High Power E-Beam Weldings Equipment* // Catalog: tekhnologii, materialy, oborudovanie. – Kiev, Institut elektrosvarki imeni E.O. Patona NAS of Ukraine, 2005. – 246 p. (Rus)

3. Nazarenko O.K., Lokshin V.E. Dynamic characteristics of high-voltage power supplies for electron beam welding // *Avtomaticheskaja svarka*. – 2005. – № 1. – Pp. 36–38.

4. Nazarenko O.K., Matveichuk V.A., Galushka V.V. Modeling of influence of high-voltage cables on a current pulsation in welding guns with automatic displacement // *Avtomaticheskaja svarka*. – 2011. – № 5. – Pp. 32–35.

5. Chaika N.K. Block of displacement and feed of cathode of an electron beam welding gun with use of pulse converters // *Avtomaticheskaja svarka*. – 2007. – № 7. – Pp. 50–52.

6. *Electric cables, wires and cords: Reference Boock* / N.I.Belorussov, A.E.Saakian, A.I.Jakovleva. Under the editorship of N.I.Belorussova. 5 izd. – Moskva: Energoatomizdat, 1988. – 536 p. (Rus)

7. *High Voltage Generator model SR60-N-6.000-EBW. User's Guide*, Technix, France, 2003.

8. *ISO 14744-1:2008 Welding – Acceptance inspection of electron beam welding machines – Part 1: Principles and acceptance conditions.*

9. Komarov N., Podoltsev A., Kucheriavaia I., Lebedev B. High-Frequency High-Voltage DC Isolation Transformer-Rectifying Module for Power Supply of Technological Equipment // EPE Journal. – 2001. – Vol. 11. – № 1. – Pp. 33–44.

10. Pat. USA 5,610,562. Mar, 11, 1997. Int.Cl⁶. - H02M 7/537, US CL. - 307/89. Daniel W. Shimer and Arnold C. Lange. E-Beam High Voltage Switching Power Supply.

Надійшла 20.07.2012

Received 20.07.2012