

УДК 537.533; 621.384

ГЕНЕРАТОР ЭМИТИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ КАК СЛОЖНАЯ НАГРУЗКА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

Д.А. АНТОНОВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доц. В.Г. ЗАЛЕССКИЙ, И.С. РУСЕЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Предлагается оценочный расчет пассивной и активной компонент полного сопротивления генератора эмитирующей плазмы. Рассмотрено влияние этих компонент на вольтамперную характеристику источника электронов в рабочем режиме. Показано, что при ряде допущений при расчете цепей питания плазменного источника электронов его полное сопротивление можно считать активным.

В плазменных источниках электронов (ПИЭЛ) в качестве генераторов плазмы, эмитирующей электроны, используются газоразрядные структуры на основе тлеющих и дуговых разрядов различных модификаций: в скрещенных ЕхН полях, с полым катодом, с осцилляцией электронов, стационарных и импульсных и других [1 - 4]. Вследствие большого разнообразия физических процессов в газовых разрядах сопротивление нагрузки источника электропитания газоразрядного промежутка не будет чисто активным. Поскольку всякая газоразрядная структура представляет собой совокупность электродов, генераторы эмитирующей плазмы обладают определенной электроемкостью. Наличие в плазме внешнего, создаваемого постоянными магнитами, и внутреннего, генерируемого движением заряженных частиц, магнитных полей позволяет предположить наличие индукционной компоненты полного сопротивления газоразрядного промежутка.

Для всех типов применяемых разрядов в различных режимах характерна нелинейная вольтамперная характеристика (ВАХ). Это предполагает нелинейную зависимость интенсивности ионизационных, эмиссионных и других процессов в плазме, в частности, от величины вкладываемой в разряд энергии, напряжения на генераторе плазмы, давления и рода плазмообразующего газа, причем в различных режимах эта нелинейность проявляется неоднозначно. Многообразие и сложность физических процессов в газовом разряде, зависимость их интенсивности от большого количества факторов делают анализ сопротивления генератора плазмы сложным. В то же время для создания эффективных систем электропитания требуется их согласование с нагрузкой. Это необходимо, во-первых, для уменьшения амплитуды скачков тока и напряжения в цепи в момент коммутации в стационарном режиме (с целью предотвращения выхода из строя полупроводниковых элементов схемы) и, во-вторых, для эффективной передачи мощности в нагрузку и уменьшения потерь в импульсном режиме.

В данной работе предлагается оценочный расчет пассивной и активной компонент полного сопротивления генератора эмитирующей плазмы, а анализ их влияния на вольтамперную характеристику источника электронов - в рабочем режиме.

С электротехнической точки зрения различные типы разряда, используемые в ПИЭЛ, отличаются только проводимостью газоразрядного промежутка (токами разряда и напряжением горения) и эмиссионными свойствами. Для оценки величины активной составляющей полного сопротивления газоразрядного промежутка необходимо проанализировать вольтамперную характеристику генератора эмитирующей плазмы в *стационарном режиме*, а для оценки пассивной составляющей - в *импульсном режиме*.

Типичный вид ВАХ генератора эмитирующей плазмы на основе тлеющего разряда в *стационарном режиме* для газоразрядной структуры, представленной в [5], показан на рис. 1, а. На основе ВАХ можно построить зависимость интегральной проводимости газоразрядного промежутка Ω (величина, равная отношению тока разряда к напряжению разряда) от тока разряда.

Зависимости интегральной проводимости от тока разряда $\Omega(i_d)$, полученные по экспериментальным ВАХ для различных давлений, показаны на рис. 1, б. Видно, что с увеличением тока разряда и давления проводимость разряда растет, причем вид зависимости в рабочем диапазоне токов разряда ($i_d > 0,1$ А) близок к линейной.

Наличие емкостной и индуктивных компонент полного сопротивления генератора эмитирующей плазмы в стационарном режиме работы ПИЭЛ проявляется только при зажигании и гашении разряда, т.е. в течение времени формирования разряда (единицы микросекунд). Так как стационарный режим предполагает длительное (единицы секунд и более) воздействие, то в большинстве случаев влиянием пассивных составляющих полного сопротивления газоразрядного промежутка можно пренебречь. Поскольку экспериментальные зависимости $\Omega(i_d)$ близки к линейным, то зависимость проводимости газоразрядного промежутка от тока разряда можно аппроксимировать линейной функцией. Такое допущение при расчете схем электрического питания позволяет приближенно считать генератор эмитирующей плазмы активной нагрузкой с величиной сопротивления порядка единиц килоом, что значительно упрощает расчет.

При этом необходимо подобрать параметры системы питания таким образом, чтобы не реализовалось условие резонанса на частотах в диапазоне 10^8 - 10^9 Гц, соответствующем плазменным колебаниям. Однако, как показывают расчеты, в реальных цепях питания таких резонансных частот не достигается.

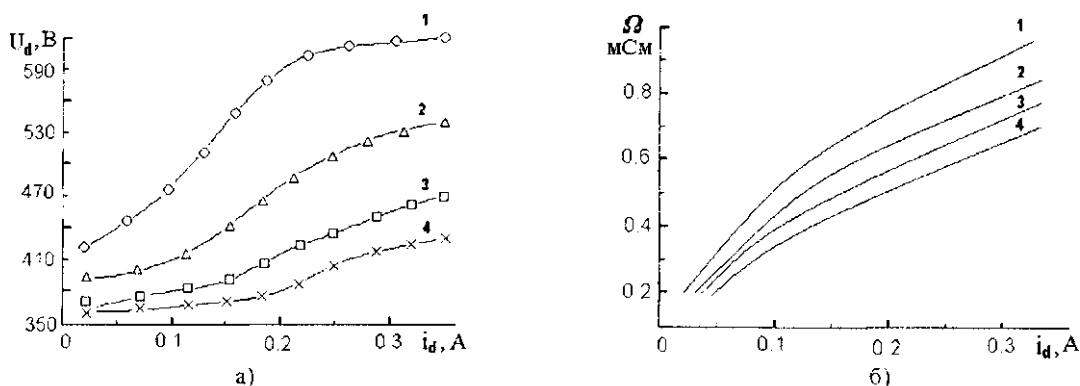


Рис. 1. Вольтамперные характеристики ПИЭЛ (а) и зависимость проводимости от тока разряда (б) для различных давлений:

1 – $p = 1.2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.; 2 – $p = 6.3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.;
3 – $p = 2.25 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.; 4 – $p = 1.25 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

Импульсный режим работы ПИЭЛ может осуществляться одиночными импульсами или пакетами импульсов заданной длительности и скважности. При этом суммарный энергетический вклад в изделие, который определяется плотностью мощности электронного пучка и суммарным временем воздействия, зависит от вида технологической операции (закалка, упрочнение, модификация поверхности и т.д.). Такой режим может быть обеспечен двумя способами: формированием импульсов разрядного напряжения при постоянном ускоряющем напряжении и формированием импульсов ускоряющим напряжением при стационарном горении разряда.

Второй способ сопряжен с рядом трудностей, связанных со значительным усложнением схемотехнических решений систем электропитания, обусловленных проблемой обеспечения пространственной и временной однородностью термического воздействия электронным пучком заданной длительности, и сложностью в обеспечении электрической прочности высоковольтных зазоров и промежутков. Поэтому целесообразно импульсы эмиссионного тока формировать за счет импульсов разрядного напряжения генератора эмитирующей плазмы. При этом получать импульсы эмиссионного тока, близкие к прямоугольным, оказывается значительно проще, поскольку для обеспечения устойчивого зажигания и горения разряда в условиях интенсивного извлечения электронов и ионов достаточно импульсы разрядного напряжения амплитудой порядка 1 кВ [6 - 8]. Для формирования таких импульсов, как правило, применяют длинные искусственные формирующие линии [9 - 10]. Теория синтеза таких линий хорошо разработана для активной нагрузки и направлена на согласование волнового сопротивления искусственных формирующих линий с входным сопротивлением нагрузки [4 - 13].

Рассмотрим эквивалентную схему нагрузки систем электропитания, где генератор эмитирующей плазмы представим как нелинейную комплексную нагрузку (рис. 2).

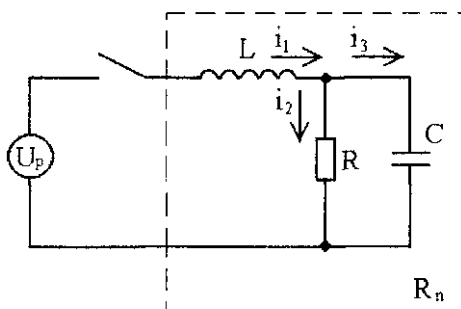


Рис. 2. Эквивалентная схема генератора эмитирующей плазмы в импульсном режиме

Для определения тока нагрузки (i_l) воспользуемся правилом Кирхгофа. В результате для фиксированного напряжения горения разряда получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_L(t) + U_R(t) &= U_p \\ U_C(t) - U_R(t) &= 0 \\ i_1(t) - i_2(t) - i_3(t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Учитывая, что $U_L(t) = L \frac{di_1(t)}{dt}$, $i_2 = \frac{U_R(t)}{R} = \frac{U_C(t)}{R}$, $i_3(t) = C \frac{dU_C(t)}{dt}$,

получим

$$LC \frac{d^2 U_C(t)}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{dU_C(t)}{dt} + U_C(t) = U_p.$$

Введя общепринятые обозначения $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\sigma = \frac{L}{2R}$, получаем уравнение

$$\frac{d^2 U_C(t)}{dt^2} + 2\sigma \frac{dU_C(t)}{dt} + \omega_0^2 U_C(t) = \omega_0^2 U_p, \quad (2)$$

решение которого имеет вид:

$$U_C(t) = U_p \left(1 - \frac{p_2}{p_2 - p_1} e^{p_1 t} + \frac{p_1}{p_2 - p_1} e^{p_2 t} \right), \quad (3)$$

где $p_{1,2} = -\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 - \omega_0^2}$.

Тогда ток в цепи нагрузки

$$i_l(t) = i_2(t) + i_3(t), \quad (4)$$

т.е.

$$i_l(t) = \frac{U_C(t)}{R} + C \frac{dU_C(t)}{dt}. \quad (5)$$

Величину емкостной компоненты генератора эмитирующей плазмы можно оценить, воспользовавшись выражением, полученным в [14]:

$$C = \frac{\epsilon_0}{kr_g} \frac{S_c}{\Phi^{3/4}}, \quad (6)$$

где $r_g = \left(\frac{\epsilon_0 T_e}{e^2 n} \right)^{1/2}$; $\Phi = \frac{e U_c}{T_e}$; k – коэффициент, значение которого лежит в пределах от 1 до 1,1. Для типичных значений катодного падения U_c , электронной температуры T_e , площади катодов S_c и концентрации n емкость разрядного промежутка составляет величину 0.1 – 0.5 мкФ. Величину этой емкости можно оценить также по величине фронта в импульсном режиме [12]. Типичной величиной времени нарастания τ_ϕ тока до максимальной величины является ~10 мкс, тогда емкость C можно определить по параметрам внешней цепи, формирующей данный импульс:

$$C = 0.5 X C_n, \quad (7)$$

где $X = \frac{T_0 m + T_0 - 0.5}{m}$; $T_0 = \frac{\tau_\phi}{\sqrt{LC_n}}$; $m = R \sqrt{\frac{L}{C_n}}$; R, L, C_n – активное сопротивление, индуктивность и емкость внешней цепи.

Расчет показывает, что емкость C соответствует ~0.4 мкФ, что удовлетворительно совпадает с полученным ранее теоретическим значением.

Оценка индуктивной составляющей комплексной нагрузки представляет еще большую трудность. Это обусловлено тем фактом, что физические процессы в разряде, такие как осцилляция электронов в межкатодном пространстве, сложное дрейфовое движение заряженных частиц в плазме, могут интерпретироваться системой электропитания как переменная индуктивность, составляющая общей нагрузки. Ситуация усложняется также наличием магнитного поля постоянных магнитов, необходимых для формирования и поддержания разряда. Поэтому расчет индуктивной составляющей нагрузки невозможен.

Оценка индуктивной компоненты (L), грубая, но все же дающая представление о порядке величины, может быть получена на основе известных физических законов:

$$L = \frac{BS}{i_d} \quad (8)$$

Для типичных значений индукции магнитного поля в области горения разряда B , площади плазменного образования S и тока разряда в рабочем режиме i_d [1 - 4], минимальное значение индуктивной компоненты составляет величину порядка единиц микрогенри.

Оценочные значения параметров нагрузки: $C = 0.4$ мкФ, $L = 25$ мкГн, $R = 30$ Ом при длительности прямоугольного импульса разряда $\tau_p = 200$ мкс в соответствии с (5) позволяют получить форму импульса тока на нагрузке (рис. 3, а). Однако реальный импульс тока разряда имеет сложный вид. Типичная форма импульса разрядного тока для различных рабочих давлений и фиксированного напряжения горения разряда U_p ($U_p \sim 650$ В) представлена на рис. 3, б.

Из рисунка видно, что импульс тока разряда имеет две области A и B . Область A характеризуется длительностью порядка 100 мкс, при этом амплитудное значение тока определяется напряжением разряда и от давления плазмообразующего газа зависит слабо (диапазон рабочих давлений $10^{-2} \dots 10^{-3}$ мм рт. ст.). Режим B соответствует меньшему значению амплитудного тока, зависимость которого от давления более существенна, чем в режиме A . В [15] показано, что повышение амплитуды тока в режиме A обусловлено десорбцией газа с электродов разрядной камеры и зависит только от площади поверхности электродов. При этом амплитудное значение импульса тока разряда достигает 20 А. Ту же величину можно получить по выражению (5) при величине сопротивления $R \sim 30$ Ом. В режиме B амплитудное значение тока разряда определяется главным образом ионизационными процессами при давлении, регламентированном напуском газа в газоразрядную структуру. Поэтому активная компонента R в этой области представляет собой функцию давления плазмообразующего газа. При этом для некоторой величины давления из рабочего диапазона давлений активное сопротивление может быть аппроксимировано ступенчатой функцией. В этом случае импульс тока разряда на эквивалентной схеме, рассчитанной по (5), имеет вид, показанный на рис. 4.

Как показывают расчеты, емкостная и индуктивная компоненты оказывают основное влияние на фронт импульса и форму импульса в области B . Поэтому при формировании импульсов тока разряда целесообразно ограничиться диапазоном длительности порядка 100 мкс, что соответствует области A . При этом амплитуда тока максимальна, а нелинейные эффекты проявляются в меньшей степени. Кроме этого, для согласования нагрузки можно в первом приближении считать активную составляющую постоянной величиной порядка десятка омов. Поскольку время нарастания фронта (10 мкс) значительно меньше длительности импульса (100 мкс), то комплексную составляющую нагрузки можно считать постоянной в оценочных значениях, приведенных выше, а в ряде случаев и вовсе можно пренебречь.

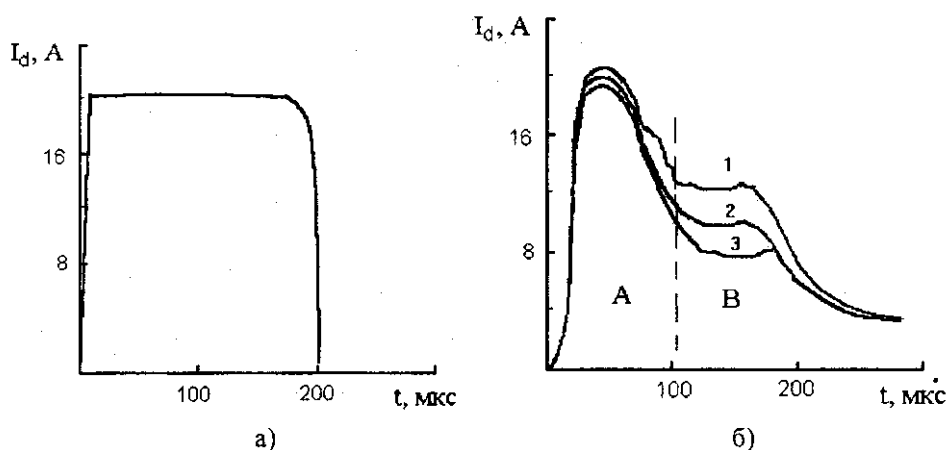


Рис. 3. Импульс тока разряда, рассчитанный по выражению (5) (а); реальная форма импульса тока разряда для различных давлений (б):
1 - $p = 1.2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.; 2 - $p = 6.3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.; 3 - $p = 2.25 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

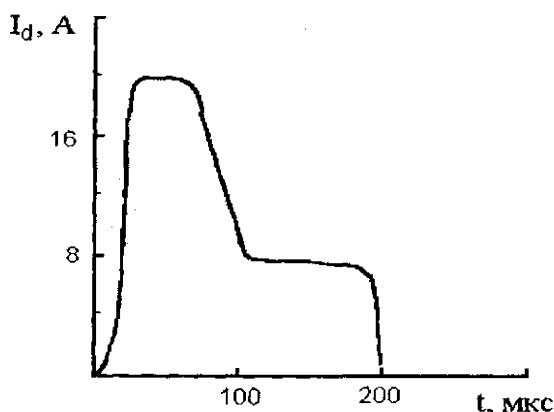


Рис. 4. Форма импульса тока разряда, рассчитанная по выражению (5) при нелинейной проводимости

Таким образом, проведенный анализ позволяет утверждать, что для создания эффективных систем электропитания необходимо учитывать тот факт, что генератор эмитирующей плазмы представляет собой комплексную нагрузку. Однако для оценки параметров питающей сети можно использовать ряд упрощений, облегчающих анализ. Во-первых, в стационарном режиме в рабочем диапазоне токов разряда вследствие зависимости $O(I_d)$, близкой к линейной, можно представить генератор плазмы как активную нагрузку порядка 1 кОм. При этом комплексную составляющую нагрузки можно не учитывать.

В импульсном режиме при формировании импульсов заданной формы комплексной составляющей избегать нельзя. Однако в оценочных расчетах сопротивление нагрузки можно считать постоянным, особенно в режиме ограничения длительности импульса разрядного тока в области, где предопределяющим процессом является десорбция газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крейнделъ Ю.Е. Плазменные источники электронов. - М.: Атомиздат, 1977.-145 с.
2. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.Л. Завьялов, Ю.Е. Крейнделъ, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 212 с.
3. Источники электронов с плазменным эмиттером / Под ред. Ю.Е. Крейнделя. - Новосибирск: Наука, 1983.-С. 80-91.
4. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / В.А. Бурдовицин, В.Л. Галанский, В.А. Груздев и др. - Екатеринбург: Наука, 1993. - 149 с.
5. Пат. ВУ 220 U, МПК H01J 3/04 Плазменный источник электронов / В.А. Груздев, В.Г. Залесский. - № 20000085; Заявл. 1.06.2000.
6. Белюк С.И., Осипов И.В., Ремпе Н.Г. Промышленное применение электронных источников с плазменным эмиттером // Известия вузов. Сер, Физика. - 2001. - Т. 44, № 9. - С. 77 - 84.
7. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // ИФЖ, - 2002. - Т. 75, № 3. - С. 166-170.
8. Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 112 с.
9. Коваль Н.Н., Нигоф М.Б. Источник питания плазменного эмиттера // Приборы и техника эксперимента. - 1980. -№6. - С 121 - 123.
10. Мельников В.Б. Источник питания плазменного эмиттера с регулируемыми параметрами // Приборы и техника эксперимента. - 1987. -№ 3. - С. 137- 138.
11. Евтянов С.И., Редькин Г.Е. Импульсные модуляторы с искусственной линией. - М.: Советское радио, 1973. - 280 с.
12. Литвиненко О.Н., Сошников В.И. Расчет формирующих линий. - Киев: Гостехиздат, 1962. - 116 с.
13. Иццоки Я.С., Овчинников Н.И. Импульсные и цифровые устройства. - М.: Советское радио, 1972. - 592 с.
14. Источники электронов с плазменным эмиттером на основе отражательного разряда с полым катодом / В.Л. Галанский, В.А. Груздев, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Известия вузов. Сер. Физика. - 1992. - Т. 35, №5.-С. 5-23.
15. Пат. ВУ 469 U, МПК H 01J 3/04. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения /В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Ю.П. Голубев. - № П20010194; Заявл. 31.07.2001; Оpubл. 30.03.2002.
16. Голубев Ю.П. Плазменные источники электронов с пучками большого сечения для электронно-лучевых технологий: Автореф. дис.... канд. техн. наук: 01.04.13 / Полоцкий гос. ун-т. - Новополоцк; ПТУ, 2003. - 20 с.