

УДК 621.387.1

В.М. СПИРИН, канд. техн. наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев)

### Устойчивость высокочастотной электрической дуги переменного тока

*Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований индуктивной цепи с высокочастотной электрической дугой. Определен критерий гашения дуги в индуктивной цепи с синусоидальным высокочастотным током. Установлено достаточное условие устойчивого горения высокочастотной дуги при переходе тока через нуль.*

*Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень індуктивного ланцюга з високочастотною електричною дугою. Визначено критерій гасіння дуги в індуктивному ланцюзі з синусоїдальним високочастотним струмом. Встановлено достатню умову стійкого горіння високочастотної дуги при проходженні струму через нуль.*

С каждым годом растет количество пускорегулирующих аппаратов (ПРА) для газоразрядных ламп высокого давления, используемых для наружного освещения, освещения промышленных помещений. В некоторых странах на освещение расходуется более 15% всей производимой электроэнергии.

Построение электромагнитных и электронных ПРА предполагает включение последовательно с газоразрядной лампой индуктивности определенной величины. В электромагнитных ПРА газоразрядные лампы питаются переменным током с частотой 50 Гц, в электронных ПРА — с частотой 30–40 кГц. В обоих случаях газоразрядную лампу можно считать эквивалентом дуговой нагрузки переменного тока соответствующей частоты.

Анализ существования и устойчивости стационарных режимов в индуктивной цепи переменного тока высокой частоты с электрической дугой является актуальной задачей, решение которой позволит оптимизировать параметры электронных ПРА и повысить их технико-экономические показатели.

Исследования электрической дуги переменного тока отражены во многих работах [3,5,6,7,8,9]. Особо следует выделить работу [3], в которой определялись критерии устойчивости стационарных режимов в индуктивной цепи с низкочастотной электрической дугой и критерии гашения дуги на основании уравнения динамики цилиндрического ствола дуги фиксированной длины, стабилизированной стенками канала, [4]

$$G^{-1} dG/dt = [(1+k)\Theta]^{-1} (u^{k+1} i^{1-k} / P_k - 1)$$

или

$$\Theta d(G^{1+k})/dt + (G^{1+k}) = i^2 P_k^{-1}, \quad (1)$$

где  $G = i/u$  — проводимость дуги;  $i$  — ток в дуге;  $u$  — напряжение на ней;  $k$  — показатель нелинейности вольтамперной характеристики дуги;  $P_k$  — константа при фиксированном  $k$ , определяемая формой температурного профиля дуги;  $\Theta$  — постоянная времени, характеризующая тепловую инерционность дуги ( $\Theta \approx \rho C_p d^2 / \lambda$ , где  $\rho, \lambda, C_p$  — соответственно плотность, теплоемкость и теплопроводность плазмы,  $d$  — диаметр ствола дуги).

Для определения стационарных режимов в индуктивной цепи с дугой в [3] рассматривалась цепь, состоящая из источника гармонической ЭДС  $e = E_m \sin(\omega t)$ , индуктивности  $L$ , дуги и сопротивления  $R_v$ , которое определяет активные потери в цепи. Из уравнения (1) при  $k = 0$  получается уравнение Майра [12], при  $k = 1$  — уравнение Касси [11].

Решение уравнения (1), линейного относительно степенного комплекса проводимости дуги ( $G^{1+k}$ ), позволило получить вольтамперные характеристики (ВАХ) дуги для первых гармоник

$$U = P_k^{1+k} / I^{(1-k)/(1+k)} \quad (2)$$

и среднеквадратичное сопротивление дуги

$$R(I) = (P_k / I^2)^{1/(1+k)}, \quad (3)$$

где  $I$  — действующее значение тока дуги  $i = I_m \sin \omega t$ .

При предположении синусоидальности тока в дуге  $i = I_m \sin(\omega t - \gamma)$  в [3] были получены критерии,

являющиеся необходимыми условиями устойчивости стационарных режимов в индуктивной цепи с дугой

$$\begin{aligned} [R_B + R(I_0)] + [R_B + (dU/dI)|_{I=I_0}] > 0; \\ [R_B + R(I_0)] [R_B + (dU/dI)|_{I=I_0}] + (\omega L)^2 > 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $I_0$  — действующее значение тока дуги в стационарном режиме в точках равновесия.

Оба критерия удовлетворяются на возрастающих участках ВАХ дуги  $U(I)$ . Первый критерий практически всегда удовлетворяется и на падающих участках ВАХ, ибо, как следует из (2) и (3), при  $0 < k < 1$   $|dU/dI| < (U/I) = R(I)$ . В предельном случае при  $k=0$ , когда  $|dU/dI| = (U/I)$ , он удовлетворяется при сколь угодно малом сопротивлении  $R_B$ . Таким образом, существенным является второй критерий устойчивости (4). При пренебрежении активными потерями в цепи ( $R_B=0$ ) для падающих участков ВАХ дуги он может быть записан в виде

$$\omega L > [(-dU/dI)(U/I)]^{0,5} |_{I=I_0},$$

или, учитывая (2) и (3),

$$\omega L > \left( \frac{1-k}{1+k} \right)^{0,5} R(I_0). \quad (5)$$

В частности, для модели Майра ( $k=0$ ), когда  $dU/dI = -R(I)$ , критерий устойчивости имеет особенно простой вид

$$\omega L > R(I_0). \quad (6)$$

Неравенство (5) получено при малых отклонениях тока от стационарного режима. Определение понятия малых отклонений тока и их количественных характеристик дано в работе [10]. Под малыми отклонениями тока принято понимать условие  $|\Delta| \ll 1$ , где  $\Delta = (I_m/I_1) \text{sign} \Psi(t)$  — относительное отклонение тока дуги вида  $i(t) = I_1 + I_m \Psi(t)$ . Здесь  $I_1$  — ток статического состояния дуги [7,8];  $I_m$  — амплитуда возмущения, функция  $\Psi(t)$  нормирована и задает вид возмущения. Для периодических возмущений условие линеаризации имеет вид  $|\Delta|/\omega\Theta \ll \pi^{-1}$ .

Выполнение последнего условия позволяет пользоваться неравенством (5).

В работе [3] также получен критерий гашения дуги при  $2\omega\Theta \ll 1$  на основании уравнения динамики цилиндрического ствола дуги и эквивалентной схемы индуктивной цепи с источником тока электрической дуги (рис. 1)

$$\omega L < R(I_0) [\sqrt{2} (2\omega\Theta)^{(1-k)/(1+k)}]^{-1},$$

и, в частности, при  $k=0$

$$\omega L < R(I_0) (2\sqrt{2} \omega\Theta)^{-1}. \quad (7)$$

Последнее неравенство является достаточным условием гашения при переходе тока через нуль.

На рис. 1  $Z_{ш}(p)$  — комплексное операторное сопротивление цепи, шунтирующей дуговой промежуток, которая может содержать линейные элементы  $R_{ш}, L_{ш}, C_{ш}$ .

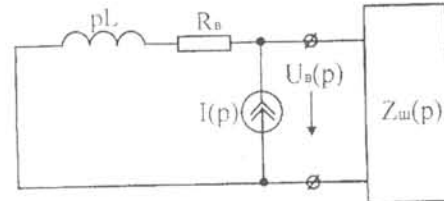


Рис. 1

Из сравнения критерия гашения (7) и критерия устойчивости (6) для модели Майра ( $k=0$ ) видно, что соблюдение условия устойчивости (6) при  $2\omega\Theta \ll 1$  недостаточно для обеспечения непрерывного горения дуги. Действительно, чтобы дуга не гасла при переходе тока через нуль, необходимо, чтобы удовлетворялось, по крайней мере, обратное (7) неравенство

$$\omega L > R(I_0) (2\sqrt{2} \omega\Theta)^{-1}. \quad (8)$$

Неравенство (7) в отличие от неравенства (5) зависит от величины постоянной времени дуги  $\Theta$ , которая задается параметрами и тепловыми процессами в дуге. В соответствии с данными, приведенными в работе [2], постоянная времени электрической дуги в газоразрядной лампе высокого давления ДНАТ-150, определяемая как  $\Theta = L_{л}/R_{л}$ , изменяется в пределах  $\Theta = (0,376 - 2,37) 10^{-3}$  с.

Неравенство (5) является необходимым условием устойчивости стационарного режима в индуктивной цепи переменного тока с дугой как при  $2\omega\Theta \gg 1$ , так и при  $2\omega\Theta \ll 1$ . Однако в последнем случае должно выполняться более строгое неравенство (8), являющееся достаточным условием устойчивости. Поэтому для повышенных частот целесообразно определить достаточное условие, при котором электрическая дуга переменного тока гасла бы при переходе через нуль, а обратное этому условию выражение можно рассматривать как достаточное условие устойчивости стационарного режима в индуктивной цепи переменного тока с дугой.

Воспользуемся для определения условия гашения дуги обобщенным критерием  $A_1$ , полученным в [3],

$$\begin{aligned} A_1 = \text{Re } s \Big|_{p=\lambda_1} L \{ G^{k-1}(t) \} = \\ = G^{k-1}(I_0, 0) - \frac{1-k}{1+k} \frac{1}{\Theta P_k} [U_B(p) \otimes U_B(p)] \Big|_{p=\lambda_1} > 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\lambda_1 = \frac{1-k}{1+k} \Theta$ ,  $[U_B(p) \otimes U_B(p)]$  — комплексная свертка изображений восстанавливающего напряжения на дуговом промежутке.

При определении критерия гашения при  $\Theta \ll 0,5T$  ( $2\omega\Theta \ll 1$ ) в [3] вблизи нуля синусоидального тока  $i(t) = I_m \sin \omega t$  этот ток заменялся линейной функцией

$$i(t) = \left( di/dt \right) \Big|_{t=0} \cdot t = \omega I_m t,$$

так как достаточно знать характер изменения остаточной проводимости в течение интервала времени порядка нескольких  $\Theta$ . При высокой же частоте  $\Theta = 2 \cdot 10^{-3} > 0,5T = 1,25 \cdot 10^{-5}$  выражение для синусоидального тока  $i(t) = I_m \sin \omega t$  нет смысла заменять иной функцией, поэтому его операторное изображение имеет вид

$$I(p) = I_m \omega / (p^2 + \omega^2).$$

Изображение для восстанавливающего напряжения на дуговом промежутке при пренебрежении шунтирующим действием остаточной проводимости дуги имеет вид

$$U_B(p) = Z_{BX}(p) \cdot I(p),$$

где  $Z_{BX}(p) = pL$  — входное операторное сопротивление цепи по отношению к дуговому промежутку. Изображение восстанавливающего напряжения представим в таком виде

$$U_B(p) = I_m \omega p L (p^2 + \omega^2)^{-1}.$$

Комплексную свертку функции  $U_B(p) = A(p)/B(p)$  определяем по следующей формуле [1]:

$$L\{u_B^2(t)\} = U_B(p) \otimes U_B(p) = \sum_{k=1}^q \frac{A(p_k)}{B'(p_k)} \cdot \frac{A(p-p_k)}{B(p-p_k)}.$$

В результате вычислений получаем

$$U_B(p) \otimes U_B(p) = \frac{(p^2 + 2\omega^2)}{p(p^2 + 4\omega^2)} I_m^2 \omega^2 L^2. \quad (10)$$

Значение остаточной проводимости дуги в момент перехода тока через нуль  $G(I_0, 0)$  равно

$$G(I_0, 0) = G(I_0) \left[ \frac{(2\omega\Theta)^2}{1 + (2\omega\Theta)^2} \right]^{1/(1+k)}.$$

При  $2\omega\Theta \gg 1$   $G(I_0, 0) = G(I_0)$  и равно средней проводимости при токе  $I_0$

$$G(I_0) = \left( I_0^2 / P_k \right)^{1/(1+k)}, \quad (11)$$

где средняя проводимость  $G(I) = [R(I)]^{-1}$ , а  $R(I)$  определяется уравнением (3).

Подставляя уравнения (10) и (11) в неравенство (9), получим

$$\begin{aligned} A_1 = \operatorname{Re} s \Big|_{p=\lambda_1} L\{G^{k-1}(t)\} = \\ = \left( I_0^2 / P_k \right)^{\frac{1-k}{1+k}} \frac{1-k}{1+k} \frac{1}{\Theta P_k} \frac{I_m^2 \omega^2 L^2 (p^2 + 2\omega^2)}{p(p^2 + 4\omega^2)} > 0. \end{aligned}$$

После преобразований с учетом (3) и того, что  $I_0 = I_m / \sqrt{2}$ , получим условие гашения электрической дуги при высокочастотном токе ( $2\omega\Theta > 1$ )

$$\omega L < R(I_0). \quad (12)$$

Из сравнения критерия устойчивости (5) и критерия гашения (12) видно, что условие (5) недостаточно для обеспечения непрерывного горения дуги. На рис. 2 показаны зависимости  $\omega L / R(I) = [(1-k)/(1+k)]^{0,5}$  и  $\omega L / R(I) = 1$ . Чтобы дуга не гасла при проходе тока через нуль, должно удовлетворяться неравенство  $\omega L > R(I_0)$ , обратное (12).

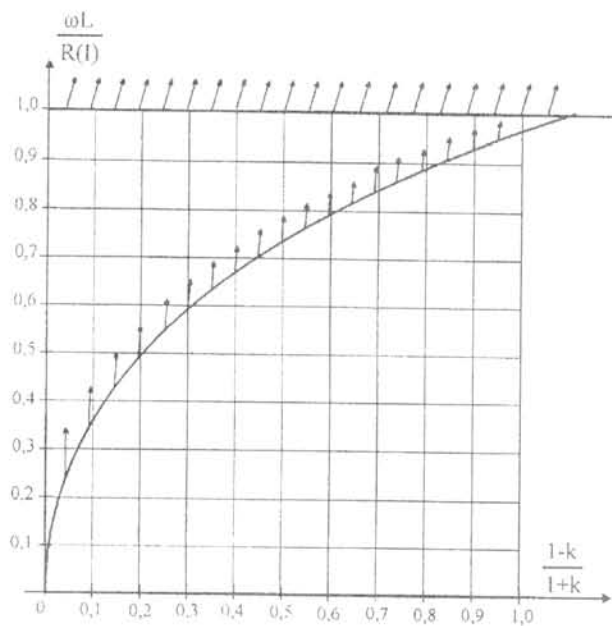


Рис. 2

В качестве иллюстрации на рис. 3 показана нагрузочная характеристика источника питания фирмы "Cisnetcom" (Италия) с газоразрядной натриевой лампой ДНАТ-150, а на рис. 4 — временные зависимости напряжения на этой лампе (кривая 1) и тока через лампу (кривая 2) для точки А на нагрузочной характеристике источника питания (рис. 3). Измеренные среднеквадратичные значения напряжения и тока лампы ДНАТ-150 в этой

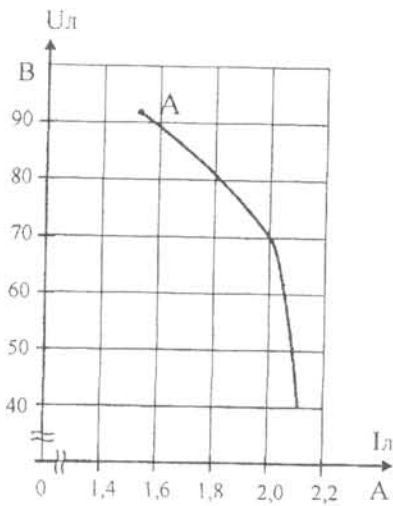


Рис. 3

точке соответственно равны:  $U_{л} = 91,6$  В,  $I_{л} = 1,54$  А.

Как видно из рис. 4, между напряжением и током лампы нет сдвига фаз, следовательно, активное сопротивление в точке А вольтамперной характеристики определяется действующими значениями напряжения  $U = 91,6$  В и тока  $I = 1,54$  А и

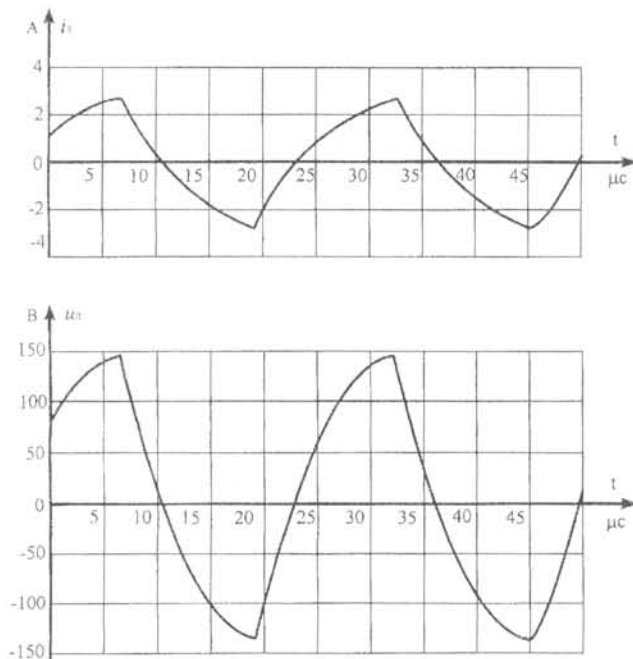


Рис. 4

равно  $R = 59,48$  Ом. Используя неравенство  $\omega L > R(I_0)$ , можно определить величину индуктивности, которая обеспечит устойчивое горение дуги:  $L > 246$   $\mu$ Гн при номинальной частоте тока источника питания  $f = 38,46$  кГц. Вольтамперная характеристика источника питания "Cisnetcom" снята при величине индуктивности, включенной последовательно с лампой, равной  $L = 390$   $\mu$ Гн, что

обеспечивает достаточный запас устойчивости. Это подтверждается и результатами эксплуатации источника питания "Cisnetcom" с газоразрядными натриевыми лампами ДНАТ-150, OSRAM-150.

Таким образом, на основании уравнения динамики цилиндрического ствола дуги фиксированной длины, стабилизированной стенками канала, определен критерий гашения дуги в индуктивной цепи с синусоидальным высокочастотным током ( $2\omega\Theta \gg 1$ ). Неравенство  $\omega L > R(I_0)$  является достаточным условием устойчивого горения дуги при переходе тока через нуль, что подтверждается экспериментальными и эксплуатационными результатами работы источников питания фирмы "Cisnetcom" (Италия) с газоразрядными натриевыми лампами ДНАТ-150 и OSRAM-150.

1. Гарднер М.Ф., Бэрис Дж.Л. Переходные процессы в линейных системах. — М.: Физматгиз, 1961. — 551 с.

2. Говоров Ф.П., Говоров В.Ф., Терещин В.Н., Денисенко В.Н. К вопросу об индуктивности разрядных ламп // Техн. электродинамика. Тем. вып. "Проблемы современной электротехники". Ч. 4. — 2006. — С. 43–48.

3. Заруди М.Е. Критерии существования и устойчивости стационарных режимов в индуктивной цепи переменного тока с дугой // Электричество. — 1977. — №4. — С. 53–60.

4. Заруди М.Е. О влиянии нелинейных свойств плазмы на характер нестационарных процессов в створе каналовой дуги (вопросы теории и расчета). // ЖТФ. — 1971. — Вып. 4. — Т. 41. — С. 734–744.

5. Крижанский С.М. К теории вольтамперной характеристики столба нестационарного дугового разряда высокого давления // ЖТФ. — 1965. — Т. 35. — №10. — С. 1882–1888.

6. Лепер Д.П., Шилин Н.В., Шлейфман И.Л. Критерии гашения дуги переменного тока // Электричество. — 1977. — №8. — С. 35–40.

7. Пентегов И.В. Исследование условий горения дуги синусоидального тока с помощью математической модели динамической дуги. // Автомат. сварка. — 1977. — №3. — С. 8–11.

8. Пентегов И.В. Математическая модель столба динамической электрической дуги // Автомат. сварка. — 1976. — №6. — С. 8–12.

9. Свирчук Ю.С. Теория электрической дуги переменного тока. / В кн.: Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена. — Новосибирск: Наука, 1977. — С. 87–114.

10. Сидорец В.Н. Обобщенная модель электрической дуги и ее приложения / Диссертация канд. техн. наук. — Киев. — 1991. — 123 с.

11. Cassie A.M. A new Theory of Arc Rupture and Circuit Severity // CIGRE. — 1939. — №102. — P. 1–14.

12. Mayr O. Beitrag zur Theorie des statischen und dynamischen Lichtbogen // Archiv f. Elektrotechnik. — 1943. — Bd 37. — S. 588–608.

Надійшла 16.01.09