

УДК 621.311.6: 621.327.7+ 621.3.011.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИМПУЛЬСНОЙ
КСЕНОНОВОЙ ЛАМПЕ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ТОКА НАКАЧКИ
ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ

Ю.А. Мандрыко, В.В. Тогатов

Проведено исследование физических процессов при формировании импульса тока накачки в плазменном канале импульсной ксеноновой лампы в режиме ограничения тока накачки внешней электрической цепью.

Ключевые слова: импульс тока накачки, плазменный канал, электрическая цепь.

Введение

Анализ физических процессов формирования плазменного канала в импульсных ксеноновых лампах (ИКЛ) выполнен в ряде работ [1–5], однако в указанных работах не учитывалось влияние на эти процессы специфики электрического режима, обусловленного конкретной электрической схемой накачки ИКЛ. За последние десять лет радикально изменилась элементная база силовой электроники, что привело к соответствующему изменению схемотехники систем накачки импульсных ламп [6].

С точки зрения режима работы импульсной ксеноновой лампы электрические схемы накачки могут быть разделены на две группы: схемы, в которых ток накачки определяется физическими процессами в ИКЛ, и схемы, в которых ток накачки определяется параметрами разрядного контура накачки и почти не зависит от физических процессов в ИКЛ.

В настоящей работе проанализированы электрические и оптические характеристики ИКЛ, работающей в электрической схеме накачки на основе LC-контура, в которой ток через ИКЛ ограничивается параметрами разрядного контура накачки.

Анализ электрических процессов в разрядном контуре накачки импульсной ксеноновой лампы

Электрическая схема накачки ИКЛ на основе LC-контура представлена на рис. 1.

При расчете физических параметров электрической схемы накачки ИКЛ будем считать заданными: электрическую энергию $W_{эл}$, поданную в ИКЛ за длительность импульса тока накачки; длительность импульса тока накачки t_T ; характеристический импеданс K_0 ИКЛ; емкость конденсатора C_K ; установившиеся величины напряжения $U_{л,д}$ между электродами ИКЛ и тока I_d в ИКЛ на стадии поддержания тока дежурной дуги. Характеристический импеданс является параметром квазистатической вольт-амперной характеристики ИКЛ [1, 6]:

$$u_{л} = K_0 \cdot \sqrt{i_{л}},$$

где $u_{л}$ – мгновенное напряжение между электродами ИКЛ. Для расчета мгновенного тока накачки $i_{л}$ в ИКЛ вводится эквивалентное активное сопротивление ИКЛ $R_{эКВ}$. Величина эквивалентного активного сопротивления ИКЛ выбирается из условия равенства поступившей в нее электрической энергии за длительность импульса тока накачки при реальной и линеаризованной вольт-амперных характеристиках ИКЛ [6]. Для расчета эквивалентного активного сопротивления ИКЛ $R_{эКВ}$ вводится эффективное значение характеристического импеданса $K_{0,Э}$ [6]:

$$R_{эКВ} = (K_{0,Э})^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{t_T}{W_{эл}} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

При переходном процессе в разрядном контуре импульс тока накачки в ИКЛ описывается формулой [6]

$$i_{л} = \frac{U_c(0) - U_{л,д}}{L_{др} \cdot \sqrt{|\delta^2 - \omega_0^2|}} \cdot \exp(-\delta \cdot t) \cdot \sin\left(\left(\sqrt{|\delta^2 - \omega_0^2|}\right) \cdot t\right) + I_d, \quad (1)$$

$$\text{где } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{др} \cdot C_K}}, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{R_{эКВ}}{2 \cdot L_{др}}. \quad (3)$$

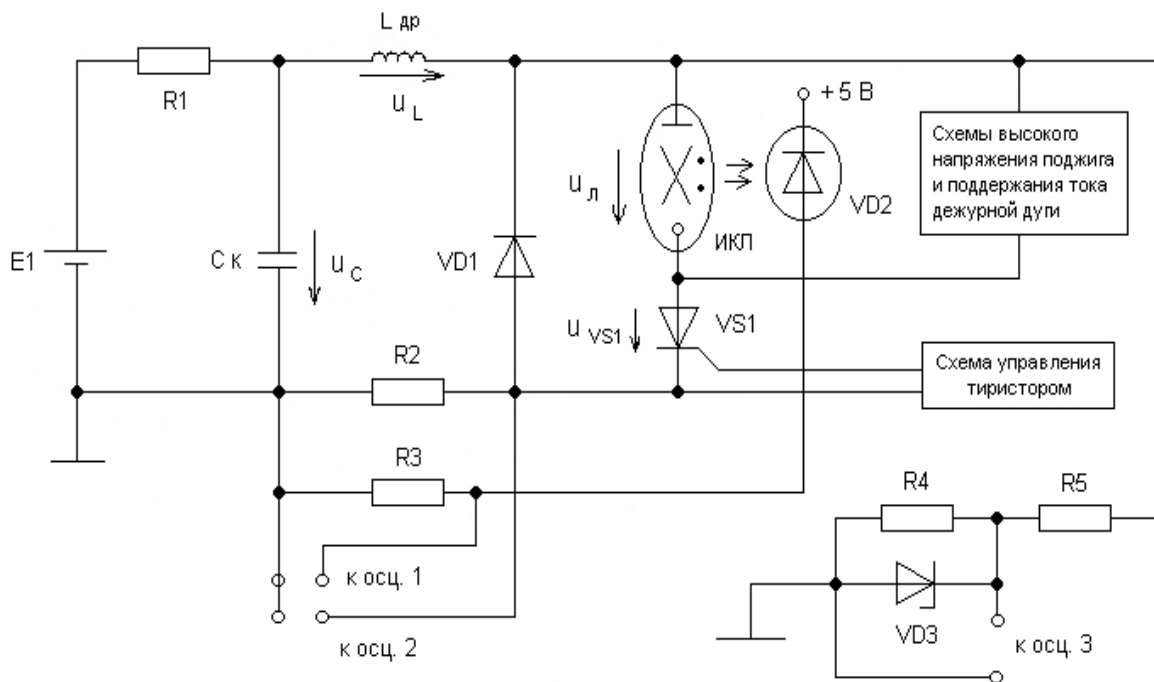


Рис. 1. Электрическая схема накачки импульсной ксеноновой лампы на основе LC-контура: $R_1=510 \text{ Ом}$ (75 Вт); $R_2=0,1 \text{ Ом}$ (5 Вт); $R_3=510 \text{ кОм}$ (0,25 Вт); $R_4=75 \text{ кОм}$ (0,5 Вт); $R_5=2,2 \text{ МОм}$ (1 Вт); $C_k=100 \text{ мкФ}$ (500 В); $L_{др}=60 \text{ мкГн}$; диод VD1 типа FR607; фотодиод VD2 типа BPW21R; стабилитрон VD3 типа KC522A; тиристор VS1 типа КУ239А; стабилизатор напряжения типа LM7805С, $E_1=300 \text{ В}$; осциллографы 1, 2, 3 типов: HPS10, HPS40, HPS50 и APS230; ИКЛ типа ИСП250

Определим длительность импульса тока накачки как временной интервал с начала формирования импульса до момента уменьшения тока накачки до установившейся величины тока дежурной дуги. При этом определении справедливо равенство, которое следует из (1):

$$\left(\sqrt{|\delta^2 - \omega_0^2|} \right) \cdot t_T = \pi. \tag{4}$$

Подставив выражения из (2) и (3) в (4) и решив полученное квадратное уравнение относительно индуктивности дросселя, приходим к формуле для расчета величины индуктивности дросселя:

$$L_{др} = \frac{1}{2 \cdot C_k} \cdot \left(\frac{t_T}{\pi} \right)^2 \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{R_{эқв} \cdot C_k \cdot \pi}{t_T} \right)^2} \right].$$

Если параметры разрядного контура накачки выбраны оптимально, то почти вся электрическая энергия W_c , запасенная в конденсаторе, поступает в ИКЛ. В этом случае начальное напряжение на конденсаторе, равное электродвижущей силе источника питания разрядного контура накачки, можно оценить по формуле [6]

$$U_c(0) = E_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot W_c}{C_k}} \approx \sqrt{\frac{2 \cdot W_{эл}}{C_k}}.$$

Анализ физических процессов в импульсной ксеноновой лампе

Процессы формирования плазменного канала в импульсной ксеноновой лампе включают в себя следующие стадии развития плазменного дугового разряда: стадию увеличения ионной температуры неравновесного плазменного канала (в состав которой входит стадия расширения плазменного канала), стадию увеличения температуры равновесного плазменного канала вплоть до максимальной величины, стадию уменьшения температуры равновесного плазменного канала при снижении тока накачки в ИКЛ до установившейся величины тока дежурной дуги.

Фронт импульса тока накачки в ИКЛ, определяемый параметрами разрядного контура накачки, формирует стадии увеличения ионной температуры неравновесного плазменного канала и увеличения температуры равновесного плазменного канала. Срез импульса тока накачки в ИКЛ, также определяемый параметрами разрядного контура накачки, формирует стадию уменьшения температуры равновес-

ного плазменного канала. Таким образом, на всех стадиях формирования плазменного канала переходный ток накачки в ИКЛ рассчитывается по формуле (1).

Так как в случае ограничения тока накачки в ИКЛ внешней электрической цепью темп увеличения тока накачки ограничивается не физическими процессами в импульсной ксеноновой лампе, а электрическими параметрами разрядного контура накачки, то физические процессы формирования плазменного канала в этих условиях можно считать квазистационарными.

Стадия расширения плазменного канала. Электрическая энергия, поступившая в ИКЛ за время любой стадии, рассчитывается по формуле

$$W_{эл,i} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} N_{эл} \cdot dt = \int_{t_i}^{t_{i+1}} i_{л} \cdot u_{л} \cdot dt, \quad (5)$$

где $i = 0, 1, 2, 3$ – индексы, соответствующие началам и окончаниям последовательно проходящих стадий формирования плазменного канала; $N_{эл}$ – электрическая мощность, поступающая в плазменный канал; $t \in (0; t_1)$ при $t = 0$ для данной стадии.

Электрическая мощность, поступающая в положительный столб плазменного канала, рассчитывается [4, 5] как

$$N_{эл.ст} = i_{л} \cdot u_{ст}.$$

Падение напряжения между краями положительного столба плазменного канала рассчитывается по формуле

$$u_{ст} = u_{л} - U_a - U_k,$$

где U_a – падение напряжения на прианодной области плазменного канала; U_k – падение напряжения на прикатодной области плазменного канала.

Импульсная ксеноновая лампа типа ИСП 250 излучает в спектральном диапазоне длин волн $\lambda \in [\lambda_1 = 180 \text{ нм}; \lambda_2 = 1100 \text{ нм}]$ [1–3]. Мощность излучения ИКЛ рассчитывается по [7]:

$$N_{изл} = \gamma_1 \cdot \frac{8 \cdot \pi \cdot h}{c^2} \cdot A_k \cdot \left(\frac{k \cdot T_э}{h} \right)^4 \cdot s_{б.к} \cdot \int_{\frac{T_{изл.2}}{T_э}}^{\frac{T_{изл.1}}{T_э}} \frac{x^3}{\exp(x) - 1} \cdot dx. \quad (6)$$

Средний спектральный относительный коэффициент излучения A_k цилиндрического ксенонового плазменного канала получен авторами с использованием [3, 8] и рассчитывается по формуле

$$A_k \approx 1 - \exp \left[- \frac{B_1 \cdot R_{\Gamma} \cdot \rho_{пл} \cdot 2 \cdot r_k \cdot T_{и}}{\left(1 - b_{кр} \cdot \frac{\rho_{пл}}{M_1} \right) \cdot M_1 \cdot (T_э)^3} \cdot \exp \left(- \frac{j_{и.а}}{k \cdot T_э} \right) \right], \quad (7)$$

где $T_{изл.1} = \frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda_1}$; $T_{изл.2} = \frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda_2}$; γ_1 – относительный коэффициент пропускания излучения кварцевых стенок колбы ИКЛ; $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме;

$k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $B_1 = 7,9 \cdot 10^{13}$ К³/(Па·м) [3]; $R_{\Gamma} = 8,314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; $\rho_{пл}$ – плотность плазмы; $M_1 = 0,1313$ кг/моль – молярная масса ксенона;

$a_{кр} = \left(\frac{T_{кр} \cdot R_{\Gamma}}{8} \right)^2 \cdot \frac{27}{P_{кр}}$, $b_{кр} = \frac{T_{кр} \cdot R_{\Gamma}}{8 \cdot P_{кр}}$ – критические постоянные из уравнения Ван-дер-Ваальса;

$T_{кр} = 289,734$ К – критическая температура ксенона; $P_{кр} = 5,84$ МПа – критическое давление ксенона; $T_{и}$ – ионная температура плазменного канала; $T_э$ – электронная температура плазменного канала; r_k – радиус плазменного канала; $j_{и.а}$ – энергия излучения атома ксенона.

Энергия излучения атома ксенона на стадии расширения плазменного канала равна $j_{и.а} = j_{и.а.эфф} \cdot 0,3$, где $j_{и.а.эфф} = 1,875 \cdot 10^{-18}$ Дж – эффективная энергия излучения атома ксенона. Электронная температура ксенонового плазменного канала $T_э$ на стадии его расширения равна электронной температуре образования ксеноновой плазмы $T_{э,0} = 6400$ К: $T_э = T_{э,0}$. Плотность плазмы $\rho_{пл}$ на данной

стадии равна электронно-ионной плотности $\rho_{э,и}$ в плазменном канале и рассчитывается по формуле, выведенной авторами с использованием [1, 4–6, 8, 9]:

$$\rho_{пл} = \rho_{э,и} = (m_{и} + m_{э}) \cdot \frac{(K_0 \cdot \sqrt{i_{л}} - U_a - U_k) \cdot D_1 \cdot T_3^{\frac{3}{2}}}{H_1 \cdot e \cdot \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{N_{э,а} \cdot k}{m_{э}}}},$$

где $N_{э,а} = 8$ – число валентных электронов в атоме ксенона; $m_{и} = 2,18 \cdot 10^{-25}$ кг – масса иона ксенона; $m_{э} = 9,1095 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона; $D_1 = 3,2 \cdot 10^{-5}$ См/(м·К²) [1]; H_1 – длина разрядного промежутка ИКЛ, примерно равная расстоянию между электродами ИКЛ; $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

Площадь боковой поверхности и радиус расширяющегося плазменного канала определяются с использованием [1, 4–6]:

$$S_{б,к} = 2 \cdot \pi \cdot H_1^2 \cdot \sqrt{\frac{i_{л}}{\pi \cdot \sigma_k \cdot (K_0 \cdot \sqrt{i_{л}} - U_a - U_k)}},$$

$$r_k = \sqrt{\frac{H_1 \cdot i_{л}}{\pi \cdot \sigma_k \cdot (K_0 \cdot \sqrt{i_{л}} - U_a - U_k)}},$$

где σ_k – удельная электрическая проводимость плазменного канала.

Ионная температура расширяющегося плазменного канала определяется по [8]:

$$T_{и} = T_{и,д}(I_{л}) + \frac{1}{\alpha_k} \cdot \ln\left(\frac{i_{л}}{I_{л}}\right),$$

где $\alpha_k = 1,087 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹ – коэффициент объемного расширения неравновесного плазменного канала; $T_{и,д}$ – установившаяся ионная температура плазменного канала на стадии поддержания тока дежурной дуги; $I_{л}$ – установившийся ток дежурной дуги.

Стадия увеличения температуры равновесного плазменного канала. Электрическая энергия $W_{эл,2}$, поступившая в ИКЛ за время этой стадии $t_{21} = t_2 - t_1$, рассчитывается по (5) при $t \in (t_1; t_2)$, $i = 1$. На рассматриваемой стадии ионная температура плазменного канала равна его электронной температуре $T_{и} = T_{э}$. Плотность ксеноновой плазмы $\rho_{пл}$ в равновесном плазменном канале равна плотности ксенона ρ_1 в ИКЛ $\rho_{пл} = \rho_1$, находящегося при температуре $T_0 = 300$ К и давлении $P_0 = 80$ кПа [2, 3]. Площадь боковой поверхности равновесного плазменного канала равна $S_{б,к} = S_{б,3}$, где $S_{б,3}$ – максимально возможная площадь боковой поверхности плазменного канала, установившегося по объему, определяемая по формуле

$$S_{б,3} = 2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot H_1,$$

где R_3 – максимально возможный радиус плазменного канала, установившегося по объему, $r_k = R_3$.

Мгновенная температура $T_{и}$ цилиндрического равновесного плазменного канала связана с током накачки $i_{л}$ в ИКЛ следующей эмпирической зависимостью [1, 4–6]:

$$T_{и} = T_3 = \sqrt{\frac{\sigma_k}{D_1}} = \sqrt{\frac{H_1 \cdot i_{л}}{\pi \cdot R_3^2 \cdot D_1 \cdot (K_0 \cdot \sqrt{i_{л}} - U_a - U_k)}}, \quad (8)$$

где $D_1 = 3,2 \cdot 10^{-5}$ См/(м·К²).

В начале стадии увеличения температуры равновесного плазменного канала его температура $T_{и}(t_1)$ равна электронной температуре образования плазмы $T_{э,0}$, а величина тока накачки в ИКЛ рассчитывается по формуле

$$i_{л}(t_1) = \left(D_1 \cdot T_{э,0}^2 \cdot K_0 \cdot \pi \cdot \frac{R_3^2}{H_1} \right)^2.$$

Мощность излучения ИКЛ на рассматриваемой стадии определяется по формуле (6), а средний спектральный относительный коэффициент излучения A_k цилиндрического плазменного канала рассчитывается по формуле (7).

Стадия уменьшения температуры равновесного плазменного канала. Электрическая энергия $W_{эл.3}$, поступившая в ИКЛ за время данной стадии $t_{32} = t_3 - t_2$, рассчитывается по формуле (5) при $t \in (t_2; t_3)$, $i = 2$. На этой стадии $T_{и} = T_3$; $\rho_{пл} = \rho_1$; $s_{б.к} = S_{б.3}$; $r_k = R_3$. Мгновенная температура T_3 цилиндрического равновесного плазменного канала связана с током накачки $i_{л}$ в ИКЛ по формуле (8). Мощность излучения ИКЛ на текущей стадии рассчитывается по формуле (6). При этом на рассматриваемой стадии средний спектральный относительный коэффициент излучения A_k цилиндрического равновесного плазменного канала достигает максимальной величины, так как плазма насыщена собственным излучением.

Отношение энергии излучения ИКЛ $W_{изл}$ за $t_T = t_3$ к электрической энергии $W_{эл}$, поданной за t_T в ИКЛ, определяет средний коэффициент полезного действия (КПД) ИКЛ $\langle \eta_{л} \rangle$:

$$\langle \eta_{л} \rangle = \frac{W_{изл}}{W_{эл}} = \frac{\int_0^{t_1} N_{изл.1} \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} N_{изл.2} \cdot dt + \int_{t_2}^{t_3} N_{изл.3} \cdot dt}{\int_0^{t_1} N_{эл.1} \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} N_{эл.2} \cdot dt + \int_{t_2}^{t_3} N_{эл.3} \cdot dt} \quad (9)$$

Расчет переходных характеристик ИКЛ выполнен при следующих начальных физических параметрах: $U_{л.д} = 48$ В, $I_{д} = 0,9$ А, $U_a = U_k = 3$ В, $R_3 = 2,3 \cdot 10^{-3}$ м, $H_1 = 40 \cdot 10^{-3}$ м, $T_{3,о} = 6400$ К, $\lambda_1 = 1,8 \cdot 10^{-7}$ м, $\lambda_2 = 1,1 \cdot 10^{-6}$ м, $\gamma_1 = 0,92$, $\rho_1 = 4,234$ кг/м³ – плотность ксенона в ИКЛ при температуре $T_0 = 300$ К и давлении $P_0 = 80$ кПа; $\rho_{пл.д} = 0,721$ кг/м³, $T_{и.д} = 2450$ К, $P_{пл.д} = 111,9$ кПа, $A_{пл.д} = 1,88 \cdot 10^{-5}$, $R_{к.д} = 4,562 \cdot 10^{-4}$ м – плотность, ионная температура, давление, средний спектральный относительный коэффициент излучения и радиус плазменного канала на стадии поддержания тока дежурной дуги соответственно.

Эксперимент

Экспериментально исследовалась эффективность накачки импульсной ксеноновой лампы типа ИСП 250, работающей в электрической схеме накачки, представленной на рис. 1. Выбор параметров разрядного контура накачки производился по методике, изложенной в разделе «Анализ электрических процессов в разрядном контуре накачки импульсной ксеноновой лампы».

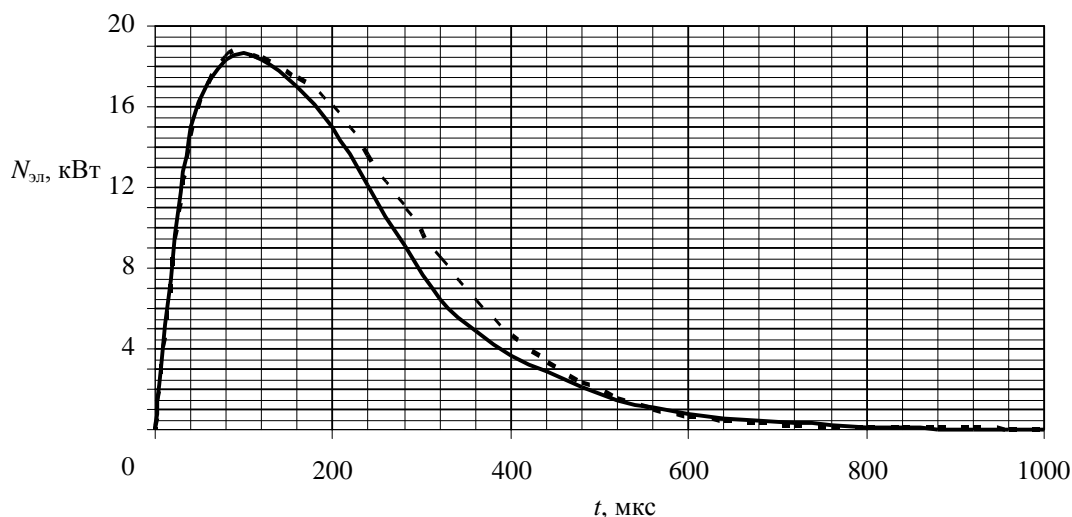


Рис. 2. Переходные характеристики электрической мощности, поступающей в импульсную ксеноновую лампу: пунктирная линия – расчетная кривая; сплошная – экспериментальная кривая

На рис. 2 представлены экспериментальная (сплошная кривая) и расчетная (пунктирная кривая) переходные характеристики $N_{изл}$ при следующих величинах физических параметров: $K_{0,3} = 11,7$ В/А^{1/2}; $K_0 \in [10; 15]$ В/А^{1/2}; $t_T = 1000$ мкс; $W_c = 4,5$ Дж – электрическая энергия в конденсаторе при $C_k = 100$ мкФ

и $U_c(0) = 300 \text{ В}$; $W_{эл} \approx W_c$. Экспериментальная кривая сравнивается с расчетной кривой электрической мощности, рассчитанной по (5). Расчетная и экспериментальная кривые приемлемо согласуются по форме импульса и порядку измеренных величин. Некоторое различие теоретической и расчетной кривых связано с неточностью линейаризации реального переходного процесса.

На рис. 3 приведена характеристика $N_{изл}$ в процессе формирования импульса накачки, рассчитанная по (6).

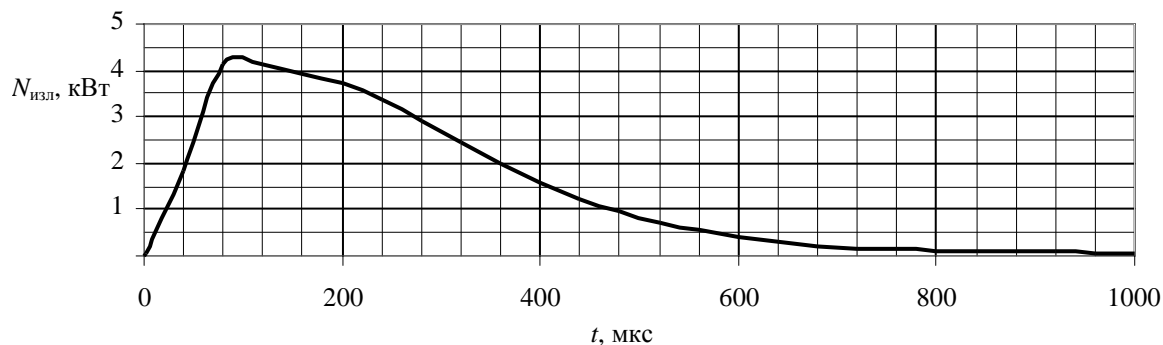


Рис. 3. Расчетная переходная характеристика мощности излучения импульсной ксеноновой лампы

Из рис. 2, 3 с учетом формулы (9) следует, что при $W_{эл} = 4,5 \text{ Дж}$ энергия излучения $W_{изл} = 1,4 \text{ Дж}$ и $(\eta_{л}) \approx 0,3 = 30\%$ за время импульса тока накачки $t_T = 1000 \text{ мкс}$.

На рис. 4 приведены переходные характеристики экспериментальной и расчетной нормированных мощностей излучения $\|N_{изл}\|$ относительно их амплитудных величин.

Экспериментальная нормированная переходная характеристика мощности излучения ИКЛ снята с фотодиода VD₂. Расчетная и экспериментальная кривые приемлемо согласуются как по форме, так и по порядку измеренных величин, однако расчетная кривая мощности излучения ИКЛ резко спадает во времени, чем экспериментальная. Указанное различие в ходе кривых связано с тем, что в предложенной методике расчета не учтена излучательная рекомбинация на стадии уменьшения температуры равновесного плазменного канала.

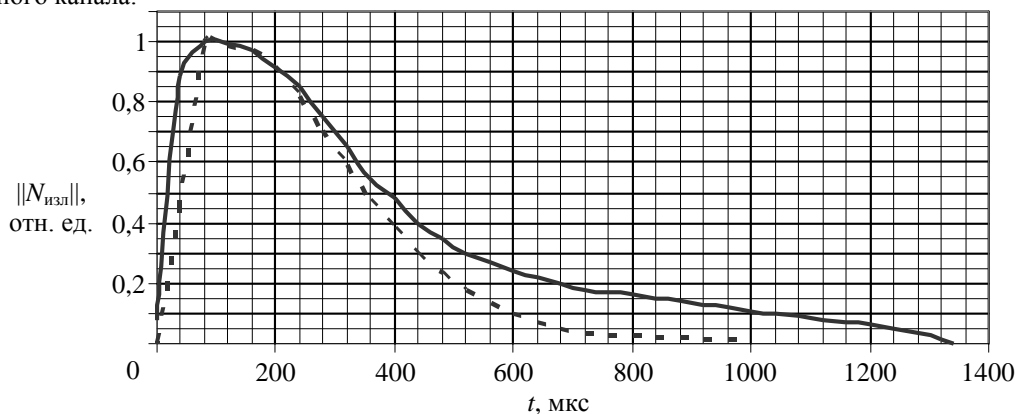


Рис. 4. Переходные характеристики нормированной мощности излучения импульсной ксеноновой лампы: пунктирная линия – расчетная кривая; сплошная – экспериментальная кривая

Заключение

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований:

- показано, что в зависимости от электрической схемы накачки импульсная ксеноновая лампа может работать в одном из двух режимов: в режиме ограничения тока накачки внешней электрической цепью (разрядным контуром накачки импульсной ксеноновой лампы) и при ограничении тока самой лампой;
- разработана методика расчета электрической схемы накачки импульсной ксеноновой лампы на основе LC-контура, которая реализует режим ограничения тока накачки внешней электрической цепью;
- представлен анализ физических процессов в электрической схеме и в импульсной ксеноновой лампе при работе в режиме ограничения тока накачки внешней электрической цепью;

- построена физико-математическая модель процесса формирования плазменного канала в импульсной ксеноновой лампе в течение импульса тока накачки при ограничении тока внешней электрической цепью;
- определен средний КПД преобразования электрической энергии, поступившей в импульсную ксеноновую лампу за время импульса тока накачки, в энергию излучения ее при ограничении тока внешней электрической цепью;
- показано, что на стадии увеличения температуры равновесной плазмы ксеноновая плазма насыщается собственным излучением, поэтому при максимальной температуре равновесного плазменного канала и на стадии уменьшения температуры равновесной плазмы относительный коэффициент излучения плазменного канала достигает максимальной величины, которая составляет сотые доли относительных единиц.

Литература

1. Мак А.А., Яшин В.Е., Сомс Л.Н., Фромзель В.А. Лазеры на неодимовом стекле. – М.: Наука, 1990. – 288 с.
2. Маршак И.С. Импульсные источники света. – М.: Энергия, 1978. – 472 с.
3. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
5. Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. – М.: Наука, 1980. – 415 с.
6. Тогатов В.В., Гнатюк П.А., Мандрыко Ю.А., Виноградов А.Г. Анализ импульсных источников питания твердотельных лазеров // Изв. вузов. Приборостроение. – 2000. – Т. 43. – № 1. – С. 80–88.
7. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – 2-е изд. – М.: Наука, 1966. – 688 с.
8. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990. – 591 с.
9. Радциг А.А., Смирнов Б.М. Справочник по атомной и молекулярной физике. – М.: Атомиздат, 1980. – 240 с.

Мандрыко Юрий Анатольевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ст. преподаватель, mandryko1@rambler.ru

Тогатов Вячеслав Вячеславович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, v.togatov@mail.ru