

УДК 621.311.6: 621.327.7+ 621.3.011.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИМПУЛЬСНОЙ  
КСЕНОНОВОЙ ЛАМПЕ ПРИ РАБОТЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЕ  
НАКАЧКИ НА ОСНОВЕ МОДУЛЯТОРА С ЧАСТИЧНЫМ РАЗРЯДОМ  
НАКОПИТЕЛЬНОЙ ЕМКОСТИ**

**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 самой лампой.

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

**Введение**

В работе [1] выполнен анализ физических процессов и характеристик в импульсной ксеноновой лампе (ИКЛ) в режиме ограничения тока накачки внешней электрической цепью. Предложенная в работе [1] физико-математическая модель приемлемо описывает процесс формирования плазменного канала в том случае, когда этот процесс можно считать квазистационарным относительно процессов в электрической схеме накачки. В настоящей работе проанализированы электрические, термодинамические и оптические характеристики ИКЛ, работающей в электрической схеме накачки на основе модулятора с частичным разрядом накопительной емкости с коммутирующим IGBT-транзистором. В этом случае ток накачки определяется физическими процессами в ИКЛ и ограничен параметрами самой лампы.

**Электрическая схема накачки импульсной ксеноновой лампы**

Электрическая схема накачки ИКЛ на основе модулятора с частичным разрядом накопительной емкости с коммутирующим IGBT-транзистором представлена на рис. 1.

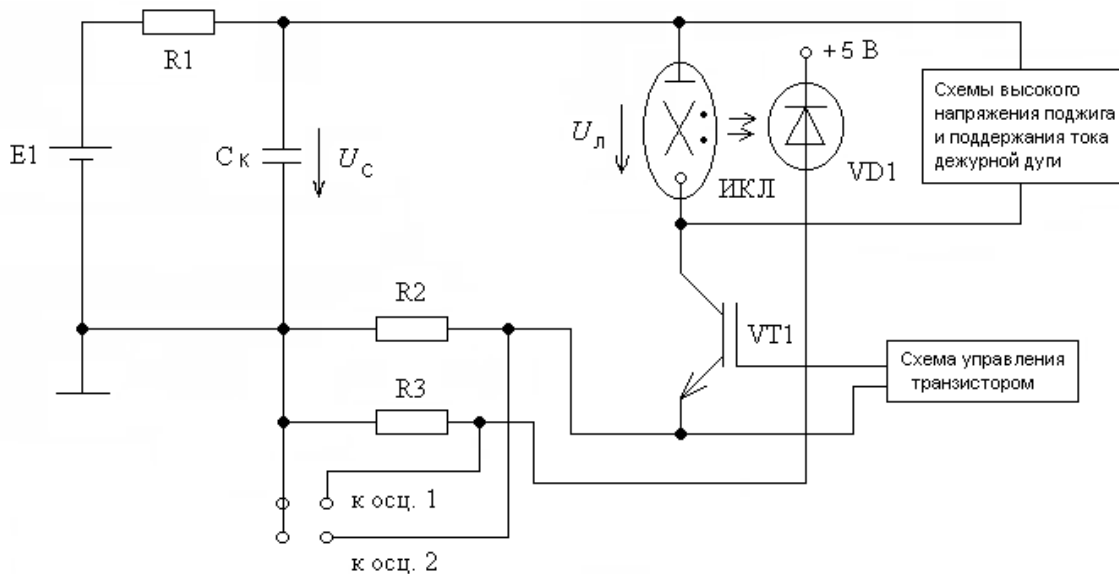


Рис. 1. Электрическая схема накачки импульсной ксеноновой лампы на основе модулятора с частичным разрядом накопительной емкости с коммутирующим IGBT-транзистором:  $R_1 = 510 \text{ Ом}$  (75 Вт);  $R_2 = 0,1 \text{ Ом}$  (5 Вт);  $R_3 = 510 \text{ кОм}$  (0,25 Вт);  $C_k = 13 \text{ мФ}$  (500 В); фотодиод VD1 типа BPW21R; IGBT-транзистор VT1 типа IRG4PSC71U;  $E_1 = 160 \text{ В}$ ; осциллографы 1, 2 типов: HPS10, HPS40, HPS50 и APS230; ИКЛ типа ИСП250

При включении IGBT-транзистора VT1 происходил разряд блока конденсаторов  $C_k$ , заряженного до напряжения  $U_c(0)$ , равног электродвижущей силе (ЭДС) источника питания  $E_1$ , через ИКЛ. При этом формировался импульс тока накачки  $i_n(t)$  в ИКЛ. Регистрация тока накачки в ИКЛ осуществлялась с помощью безындуктивного датчика тока  $R_2$ . Напряжение между электродами ИКЛ  $U_{л}$ , равное напряжению на блоке конденсаторов  $U_{л} = U_c$ , в процессе формирования импульса тока накачки в ИКЛ оставалось практически постоянным, так как при выбранной емкости блока конденсаторов  $C_k = 13 \text{ мФ}$  его разряд за время импульса тока  $t_t$  пренебрежимо мал. Электрическая энергия  $W_{эл}$ , поступившая в ИКЛ, может регулироваться либо за счет изменения величины ЭДС источника питания  $E_1 = U_c(0)$ , либо за счет изменения длительности импульса тока накачки  $t_t$  в ИКЛ. Для регистрации мощности излучения ИКЛ  $N_{изл}$  использовался фотодиод VD1, включенный по фотодиодной схеме. Величина фототока снижалась с датчика тока  $R_3$ .

#### Анализ физических процессов в импульсной ксеноновой лампе

Процессы формирования плазменного канала в ИКЛ 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 и стадию поддержания температуры равновесного плазменного канала. На первых двух стадиях формируется фронт импульса тока накачки в ИКЛ, на третьей – плоская часть импульса. Важно подчеркнуть, что на всех трех стадиях поведение тока накачки в ИКЛ определяется процессом формирования плазменного канала и величиной ЭДС источника питания  $E_1$ .

Для анализа процессов на стадии увеличения ионной температуры неравновесного плазменного канала необходимо знать его установившуюся ионную температуру  $T_{и,д}$  на стадии поддержания тока дежурной дуги. Исходными параметрами при анализе процессов на стадии увеличения ионной температуры неравновесного плазменного канала являются установившиеся величины напряжения  $U_{л,д}$  и тока  $I_{д}$  в ИКЛ в режиме дежурной дуги, а также другие физические и геометрические параметры ИКЛ. Для определения  $T_{и,д}$  произведено численное решение уравнения баланса мощностей на стадии поддержания тока дежурной дуги, согласно которому электрическая мощность  $N_{эл,ст,д}$ , поступающая в положительный

столб плазменного канала, равна сумме мощностей излучения плазменного канала  $N_4$  и теплоотдачи  $N_5$  в окружающую среду.

При расчете переходной характеристики тока накачки  $i_n(t)$  и остальных физических параметров в ИКЛ считали заданными ЭДС источника питания  $E_1$ , длительность импульса тока накачки  $t_T$ , емкость блока конденсаторов  $C_k$ , а также физические и геометрические параметры ИКЛ.

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

$$W_{эл,j} = \int_{t_j}^{t_{j+1}} N_{эл} \cdot dt = \int_{t_j}^{t_{j+1}} i_n \cdot U_n \cdot dt, \quad (1)$$

где  $N_{эл}$  – электрическая мощность, поступающая в ИКЛ и распределяющаяся в положительном столбе, прианодной и прикатодной областях ИКЛ;  $i_n$  – мгновенный ток накачки в ИКЛ;  $U_n$  – напряжение между электродами ИКЛ;  $j = 0, 1, 2, 3$  – индексы, соответствующие началам и окончаниям последовательно проходящих стадий формирования плазменного канала; текущее время на стадии расширения плазменного канала лежит в интервале  $t \in (0; t_1)$ .

Электрическая мощность  $N_{эл,ст}$ , поступающая в положительный столб расширяющегося плазменного канала, расходуется на мощность расширения плазменного канала  $N_{2,3}$ , мощность излучения плазменного канала  $N_4$  и мощность теплоотдачи  $N_5$  из плазменного канала в воздух, окружающий ИКЛ и находящийся при температуре  $T_0$ .

Теплоотдача осуществляется через граничную область, холодный ксенон и стенки колбы ИКЛ. Между плазменным каналом и холодным ксеноном существует граничная область толщиной  $\Delta l = 0, 2$  мм [2–4].

На рассматриваемой стадии уравнение баланса мощностей выглядит следующим образом:

$$N_{эл,ст} = N_{2,3} + N_4 + N_5. \quad (2)$$

Электрическая мощность, поступающая в положительный столб плазменного канала, равна

$$N_{эл,ст} = i_n \cdot U_{ст}. \quad (3)$$

Падение напряжения между краями положительного столба плазменного канала рассчитывается по формуле [5, 6]:

$$U_{ст} = U_n - U_a - U_k,$$

где  $U_a$  – падение напряжения на прианодной области плазменного канала;  $U_k$  – падение напряжения на прикатодной области плазменного канала. Мощность расширения плазменного канала  $N_{2,3}$  складывается из мощности  $N_2$ , расходуемой на нагрев расширяющегося плазменного канала, и мощности  $N_3$ , необходимой для образования ксеноновой плазмы (мощности фазового перехода из газообразного в плазменное состояние)

$$N_{2,3} = N_2 + N_3.$$

Формула, связывающая мощность расширения плазменного канала со скоростью изменения объема последнего, имеет вид

$$N_{2,3} = \rho_{пл} \cdot \left[ C_{р.о} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_k} + T_n \right) + \varpi_{пл.о} \right] \cdot \frac{dv_k}{dt}, \quad (4)$$

где  $\frac{dv_k}{dt} = \frac{H_1}{\sigma_k \cdot E_{ст}} \cdot \frac{di_n}{dt}$ ;  $\rho_{пл}$  – объемная плотность плазмы в канале;  $C_{р.о} = 158,3$  Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость ксеноновой плазмы при квазистационарном давлении и электронной температуре образования ксеноновой плазмы  $T_{э,о} = 6400$  К;  $\alpha_k = 1,087 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup> – коэффициент объемного расширения неравновесного плазменного канала;  $\varpi_{пл.о}$  – удельная энергия образования плазмы;  $v_k$  – мгновенный объем плазменного канала;  $H_1$  – длина положительного столба плазменного канала, близкая к расстоянию между электродами ИКЛ;  $\sigma_k$  – удельная электрическая проводимость плазменного канала;  $E_{ст}$  – напряженность электрического поля в положительном столбе плазменного канала.

Ионная температура расширяющегося плазменного канала определяется по [7]:

$$T_n = T_{н,д}(I_d) + \frac{1}{\alpha_k} \cdot \ln \left( \frac{i_n}{I_d} \right), \quad (5)$$

где  $T_{и.д}$  – установившаяся ионная температура плазменного канала на стадии поддержания тока дежурной дуги;  $I_d$  – установившийся ток дежурной дуги.

Удельная энергия образования плазмы рассчитывается по формуле, полученной авторами с учетом [5, 6]:

$$\varpi_{пл.о} = \frac{n_э}{\left(1 + \frac{n_{в.а}}{n_э}\right) \cdot \rho_{пл}} \cdot \frac{3}{2} \cdot k \cdot T_{э.о},$$

где  $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T_{э.о}$  – электронная температура образования плазмы. Концентрация электронов  $n_э$  в плазменном канале определяется по формуле, полученной авторами с использованием [2, 5, 6]:

$$n_э = \frac{(U_l - U_a - U_k) \cdot D_1 \cdot T_э^{\frac{3}{2}}}{H_1 \cdot e \cdot \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{N_{э.а} \cdot k}{m_э}}},$$

где  $D_1 = 3,2 \cdot 10^{-5}$  См/(м·К<sup>2</sup>) [2];  $T_э$  – электронная температура плазменного канала;  $N_{э.а} = 8$  – число валентных электронов в атоме ксенона;  $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;  $m_э = 9,1095 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона.

Из уравнения Больцмана рассчитывается концентрация  $n_{в.а}$  возбужденных атомов в плазменном канале [8]:

$$n_{в.а} = n_1 \cdot \frac{G_{в.а}}{G_{а.0}} \cdot \exp\left[-\frac{j_1}{W_{э.а}}\right],$$

где  $G_{а.0} = 1$  – статистическая сумма основного состояния атома;  $j_1 = 8,32$  эВ – энергия возбуждения атома ксенона;  $n_1$  – концентрация атомов ксенона, находящихся в основном состоянии, определяемая соотношением [7]:

$$n_1 = \frac{\rho_1}{M_1} \cdot N_A,$$

где  $\rho_1$  – плотность ксенона при температуре  $T_0 = 300$  К и давлении  $P_0 = 80$  кПа;  $T_0$  – температура воздуха, окружающего ИКЛ, равная температуре стенок колбы ИКЛ;  $M_1 = 0,1313$  кг/моль – молярная масса ксенона;  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число Авогадро.

Статистическая сумма возбужденных состояний атома находится из выражения [8]

$$G_{в.а} = \sum_{y=1}^9 g_{а.у} \cdot \exp\left[-\frac{W_{а.у} - W_{а.0}}{W_{э.а}}\right],$$

где  $y$  – номер энергетического состояния атома;  $g_{а.у}$  – статистические веса возбужденных состояний атома:  $g_{а.0} = 1$ ,  $g_{а.1} = 5$ ,  $g_{а.2} = 3$ ,  $g_{а.3} = 1$ ,  $g_{а.4} = 3$ ,  $g_{а.5} = 3$ ,  $g_{а.6} = 5$ ,  $g_{а.7} = 7$ ,  $g_{а.8} = 3$ ,  $g_{а.9} = 5$ ;  $W_{а.у}$  – энергии термов атома:  $W_{а.1} = 8,315$  эВ,  $W_{а.2} = 8,436$  эВ,  $W_{а.3} = 9,447$  эВ,  $W_{а.4} = 9,57$  эВ,  $W_{а.5} = 9,58$  эВ,  $W_{а.6} = 9,686$  эВ,  $W_{а.7} = 9,721$  эВ,  $W_{а.8} = 9,789$  эВ,  $W_{а.9} = 9,821$  эВ.

Энергия основного термина атома  $W_{а.0}$  равна

$$W_{а.0} = \frac{3}{2} \cdot \frac{k \cdot T_0}{Z_1},$$

где  $Z_1 = 1,6022 \cdot 10^{-19}$  Дж/эВ.

Суммарная средняя энергия электронов  $W_{э.а}$  в возбужденном атоме ксенона рассчитывается по формуле

$$W_{э.а} = \frac{N_{э.а}}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{k \cdot T_э}{Z_1}.$$

Плотность плазмы  $\rho_{пл}$  на данной стадии находится из соотношения, полученного авторами с учетом [2, 5, 6, 8]:

$$\rho_{\text{пл}} = (m_{\text{и}} + m_{\text{э}}) \cdot \frac{(U_{\text{л}} - U_{\text{а}} - U_{\text{к}}) \cdot D_1 \cdot T_3^{\frac{3}{2}}}{H_1 \cdot e \cdot \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{N_{\text{э.а}} \cdot k}{m_{\text{э}}}}} + m_{\text{а}} \cdot n_{\text{в.а}},$$

где  $N_{\text{э.а}} = 8$  – число валентных электронов в атоме ксенона;  $m_{\text{и}} = 2,18 \cdot 10^{-25}$  кг – масса иона ксенона;  $m_{\text{а}} = m_{\text{и}} + m_{\text{э}}$  – масса атома ксенона.

Ксеноновая плазма излучает в спектральном диапазоне длин волн  $\lambda \in [0; \infty)$  [2–4]. Формула для расчета мощности излучения плазменного канала имеет вид [9]

$$N_4 = \frac{8 \cdot \pi \cdot h}{c^2} \cdot A_{\text{к}} \cdot \left(\frac{k \cdot T_3}{h}\right)^4 \cdot s_{\text{б.к}} \cdot \int_0^{\infty} \frac{x^3}{\exp(x) - 1} \cdot dx. \quad (6)$$

Средний спектральный относительный коэффициент излучения  $A_{\text{к}}$  цилиндрического ксенонового плазменного канала, полученный авторами с учетом [4, 7], находится по формуле

$$A_{\text{к}} \approx 1 - \exp \left[ - \frac{B_1 \cdot \rho_{\text{пл}} \cdot R_{\text{г}} \cdot T_{\text{и}} \cdot 2 \cdot r_{\text{к}}}{\left(1 - b_{\text{кр}} \cdot \frac{\rho_{\text{пл}}}{M_1}\right) \cdot M_1 \cdot (T_3)^3} \cdot \exp \left( - \frac{j_{\text{и.а}}}{k \cdot T_3} \right) \right], \quad (7)$$

где  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость излучения;  $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $B_1 = 7,9 \cdot 10^{13}$  К<sup>3</sup>/(Па·м) [4];  $R_{\text{г}} = 8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;  $M_1 = 0,1313$  кг/моль – молярная масса ксенона;  $b_{\text{кр}} = \frac{R_{\text{г}} \cdot T_{\text{кр}}}{8 \cdot P_{\text{кр}}}$  – критическая постоянная из уравнения Ван-дер-Ваальса;  $T_{\text{кр}} = 289,734$  К – критическая температура ксенона;  $P_{\text{кр}} = 5,84$  МПа – критическое давление ксенона;  $r_{\text{к}}$  – радиус плазменного канала;  $j_{\text{и.а}}$  – энергия излучения атома ксенона.

При расчете мощности излучения ИКЛ следует учесть, что ИКЛ типа ИСП250 излучает в спектральном диапазоне длин волн  $\lambda \in [\lambda_1 = 180 \text{ нм}; \lambda_2 = 1100 \text{ нм}]$  [2–4]. Формула для расчета мощности излучения ИКЛ имеет вид [9]

$$N_{\text{изл}} = \gamma_1 \cdot \frac{8 \cdot \pi \cdot h}{c^2} \cdot A_{\text{к}} \cdot \left(\frac{k \cdot T_3}{h}\right)^4 \cdot s_{\text{б.к}} \cdot \int_{\frac{T_{\text{изл.2}}}{T_3}}^{\frac{T_{\text{изл.1}}}{T_3}} \frac{x^3}{\exp(x) - 1} \cdot dx, \quad (8)$$

где  $T_{\text{изл.1}} = \frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda_1}$ ;  $T_{\text{изл.2}} = \frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda_2}$ ;  $\gamma_1$  – относительный коэффициент пропускания излучения кварцевых стенок колбы ИКЛ.

Энергия излучения атома ксенона на стадии расширения плазменного канала равна  $j_{\text{и.а}} = j_{\text{и.а.эфф}}$ , где  $j_{\text{и.а.эфф}} = 1,875 \cdot 10^{-18}$  Дж – эффективная энергия излучения атома ксенона. Электронная температура ксенонового плазменного канала  $T_3$  на стадии его расширения равна электронной температуре образования ксеноновой плазмы  $T_{\text{э.о}} = 6400$  К:  $T_3 = T_{\text{э.о}}$ .

Площадь боковой поверхности и радиус расширяющегося плазменного канала определяются следующим образом [2, 5, 6]:

$$s_{\text{б.к}} = 2 \cdot \pi \cdot H_1^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{\frac{i_{\text{л}}}{\pi \cdot \sigma_{\text{к}} \cdot (U_{\text{л}} - U_{\text{а}} - U_{\text{к}})}}, \quad (9)$$

$$r_{\text{к}} = \sqrt{\frac{H_1 \cdot i_{\text{л}}}{\pi \cdot \sigma_{\text{к}} \cdot (U_{\text{л}} - U_{\text{а}} - U_{\text{к}})}},$$

где  $\sigma_{\text{к}}$  – удельная электрическая проводимость плазменного канала.

Формула для расчета мощности теплоотдачи  $N_5$  из расширяющегося плазменного канала в воздух, окружающий ИКЛ и находящийся при температуре  $T_0$ , через граничную область, холодный ксенон и стенки колбы ИКЛ имеет вид [7]

$$N_5 = \chi_1 \cdot s_{б.к} \cdot \frac{T_n - T_0}{\Delta l}, \quad (10)$$

где  $\chi_1 = 3 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности ксенона;  $\Delta l = 0,2$  мм – толщина граничной области с ксеноном, в которой его температура падает от величины ионной температуры плазменного канала до температуры ксенона, находящегося при температуре  $T_0$ .

Расчет переходной характеристики тока в ИКЛ  $i_n(t)$  на стадии расширения плазменного канала произведен в результате численного решения уравнения баланса мощностей, выведенного авторами из выражений (2)–(4), (6), (10):

$$\begin{aligned} i_n \cdot U_{ст} = \rho_{пл} \cdot \left[ C_{р.о} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_k} + T_n(i_n) \right) + \varpi_{пл.о} \right] \cdot \frac{H_1}{\sigma_k \cdot E_{ст}} \cdot \frac{di_n}{dt} + \\ + \frac{8 \cdot \pi \cdot h}{c^2} \cdot A_k(i_n) \cdot \left( \frac{k \cdot T_{э.о}}{h} \right)^4 \cdot s_{б.к}(i_n) \cdot \int_0^\infty \frac{x^3}{\exp(x) - 1} \cdot dx + \\ + \chi_1 \cdot s_{б.к}(i_n) \cdot \frac{T_n(i_n) - T_0}{\Delta \ell}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $T_n(i_n)$ ,  $A_k(i_n)$ ,  $s_{б.к}(i_n)$  – зависимости, приведенные в выражениях (5), (7), (9). По рассчитанной переходной характеристике тока накачки  $i_n(t)$  в ИКЛ из уравнения (11) и формул (1), (8) построены переходные характеристики мгновенной электрической мощности  $N_{эл}(t)$ , поступающей в ИКЛ, и мгновенной мощности излучения ИКЛ  $N_{изл}(t)$ .

**Стадия увеличения температуры равновесного плазменного канала.** Электрическая энергия  $W_{эл.2}$ , поступившая в ИКЛ за длительность этой стадии  $t_{21} = t_2 - t_1$ , рассчитывается по формуле (1). Текущее время на рассматриваемой стадии лежит в интервале  $t \in (t_1; t_2)$ . На этой стадии ионная температура плазменного канала равна его электронной температуре  $T_n = T_э$ . Объемная плотность ксеноновой плазмы  $\rho_{пл}$  в равновесном плазменном канале равна плотности ксенона  $\rho_1$  в ИКЛ, находящегося при температуре  $T_0 = 300$  К и давлении  $P_0 = 80$  кПа [3, 4],  $\rho_{пл} = \rho_1$ . Площадь боковой поверхности равновесного плазменного канала  $s_{б.к}$  равна максимально возможной площади боковой поверхности  $S_{б.к.м}$  установившегося по объему плазменного канала

$$S_{б.к.м} = 2 \cdot \pi \cdot R_{к.м} \cdot H_1,$$

где  $R_{к.м}$  – максимально возможный радиус установившегося по объему плазменного канала.

Максимально возможный объем равновесного плазменного канала  $V_{к.м}$  равен

$$V_{к.м} = \pi \cdot R_{к.м}^2 \cdot H_1.$$

Электрическая мощность  $N_{эл.ст}$ , поступающая в положительный столб равновесного плазменного канала, расходуется на мощность нагрева равновесного плазменного канала  $N_2$ , мощность излучения  $N_4$  и мощность теплоотдачи  $N_5$  из равновесного плазменного канала в воздух, окружающий ИКЛ и находящийся при температуре  $T_0$ , через пристеночную граничную область с ксеноном, сжатым до высокого давления, и стенки колбы ИКЛ. На рассматриваемой стадии уравнение баланса мощностей выглядит следующим образом:

$$N_{эл.ст} = N_2 + N_4 + N_5. \quad (12)$$

Электрическая мощность  $N_{эл.ст}$ , поступающая в положительный столб равновесного плазменного канала, определяется по формуле (3).

Мощность, идущую на нагрев равновесного плазменного канала, можно представить в виде

$$N_2 \approx \rho_{пл} \cdot C_v \cdot V_{к.м} \cdot \frac{dT_n}{dt}, \quad (13)$$

где  $V_{к.м}$  – объем равновесного плазменного канала;  $C_v$  – удельная теплоемкость равновесного плазменного канала при постоянном объеме, рассчитываемая по формуле Майера

$$C_v = C_p - \frac{R_\Gamma}{M_1}.$$

Удельная теплоемкость  $C_p$  равновесной ксеноновой плазмы при квазистационарном давлении начинает изменяться, когда температура последней превышает электронную температуру образования плазмы  $T_{3,0}$ . При этом  $C_p$  рассчитывается по эмпирической формуле [10, 11]

$$C_p = C_{p,0} \cdot \exp(\beta_c \cdot (T_n - T_{3,0})),$$

где  $\beta_c = 6 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ .

Мгновенная ионная температура  $T_n$  цилиндрического равновесного ксенонового плазменного канала связана с током накачки  $i_n$  в ИКЛ следующей эмпирической зависимостью [2, 5, 6]:

$$T_n = T_3 = \sqrt{\frac{\sigma_k}{D_1}} = \sqrt{\frac{H_1 \cdot i_n}{\pi \cdot R_{к.м}^2 \cdot D_1 \cdot (U_n - U_a - U_k)}}, \quad (14)$$

где  $D_1 = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ СМ}/(\text{М} \cdot \text{К}^2)$ . В начале стадии увеличения температуры равновесного плазменного канала его температура  $T_n(t_1)$  равна электронной температуре образования плазмы  $T_{3,0}$ , а величина тока накачки в ИКЛ рассчитывается по формуле

$$i_n(t_1) = D_1 \cdot T_{3,0}^2 \cdot (U_n - U_a - U_k) \cdot \pi \cdot \frac{R_{к.м}^2}{H_1}.$$

Мощность излучения ИКЛ  $N_{изл}$  на рассматриваемой стадии определяется по формуле (8), а средний спектральный относительный коэффициент излучения  $A_k$  цилиндрического ксенонового плазменного канала рассчитывается по формуле (7). Расчет переходной характеристики тока накачки в ИКЛ  $i_n(t)$  на стадиях увеличения и поддержания температуры равновесного плазменного канала произведен в результате численного решения уравнения баланса мощностей (12), которое с помощью формул (3), (6), (10), (13) приведено к виду

$$i_n \cdot U_{ст} = \rho_{пл} \cdot C_v \cdot V_k \cdot \frac{dT_n(i_n)}{dt} + \frac{8 \cdot \pi \cdot h}{c^2} \cdot A_k(i_n) \cdot \left(\frac{k \cdot T_3(i_n)}{h}\right)^4 \cdot S_{б.к.м} \cdot \int_0^\infty \frac{x^3}{\exp(x) - 1} \cdot dx + \chi_1 \cdot S_{б.к.м} \cdot \frac{T_n(i_n) - T_0}{\Delta \ell}, \quad (15)$$

где  $T_n(i_n) = T_3(i_n)$ ,  $A_k(i_n)$  – зависимости, представленные в выражениях (7), (14). По рассчитанной переходной характеристике тока накачки  $i_n(t)$  в ИКЛ из уравнения (15) и выражений (1), (8) рассчитаны переходные характеристики мгновенной электрической мощности  $N_{эл}(t)$ , поступающей в ИКЛ, и мгновенной мощности излучения ИКЛ  $N_{изл}(t)$ .

**Стадия поддержания температуры равновесного плазменного канала.** Электрическая энергия  $W_{эл,3}$ , поступившая в ИКЛ за длительность данной стадии  $t_{32} = t_3 - t_2$ , рассчитывается по формуле (1). Текущее время на рассматриваемой стадии лежит в интервале  $t \in (t_2; t_3)$ . На этой стадии  $T_n = T_3$ ,  $\rho_{пл} = \rho_1$ ,  $s_{б.к} = S_{б.к.м}$ ,  $r_k = R_{к.м}$ . Мгновенная температура  $T_3$  цилиндрического равновесного ксенонового плазменного канала связана с током накачки  $i_n$  в ИКЛ по формуле (14).

Мощность излучения ИКЛ  $N_{изл}$  на данной стадии рассчитывается по формуле (8). При этом на рассматриваемой стадии средний спектральный относительный коэффициент излучения  $A_k$  цилиндрического равновесного плазменного канала принимает максимальное значение, так как плазма насыщена собственным излучением.

Отношение энергии излучения ИКЛ  $W_{изл}$  за время импульса тока  $t_t = t_3$  к электрической энергии  $W_{эл}$ , поступившей за время  $t_t$  в ИКЛ, определяет средний коэффициент полезного действия (КПД) ИКЛ  $\langle \eta_n \rangle$ :

$$\langle \eta_n \rangle = \frac{W_{изл}}{W_{эл}} = \frac{\int_0^{t_1} N_{изл,1} \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} N_{изл,2} \cdot dt + \int_{t_2}^{t_3} N_{изл,3} \cdot dt}{\int_0^{t_1} N_{эл,1} \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} N_{эл,2} \cdot dt + \int_{t_2}^{t_3} N_{эл,3} \cdot dt}. \quad (16)$$

### Эксперимент

Экспериментально исследовалась эффективность накачки ИКЛ типа ИСП250, работающей в электрической схеме накачки, представленной на рис. 1.

На рис. 2 представлена расчетная (пунктирная кривая) переходная характеристика  $N_{эл}(t)$ , полученная по уравнениям (11), (15) и (1) при следующих величинах параметров ИКЛ и режима работы:  $E_1 = U_c(0) = 160$  В,  $t_r = 200$  мкс,  $U_{д.д} = 48$  В,  $I_d = 0,9$  А,  $U_a = U_k = 3$  В,  $R_{к.м} = 2,3 \cdot 10^{-3}$  м,  $H_1 = 40 \cdot 10^{-3}$  м,  $T_{3,0} = 6400$  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/м<sup>3</sup> – плотность ксенона в ИКЛ при температуре  $T_0 = 300$  К и давлении  $P_0 = 80$  кПа;  $\rho_{пл.д} = 0,721$  кг/м<sup>3</sup>,  $T_{и.д} = 2450$  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, радиус плазменного канала на стадии поддержания тока дежурной дуги соответственно. На этом же рисунке приведена экспериментальная (сплошная кривая) переходная характеристика  $N_{эл}(t)$ , снятая в электрической схеме накачки ИКЛ, показанной на рис. 1, при тех же значениях параметров ИКЛ и том же режиме работы. Как следует из рис. 2, расчетная и экспериментальная кривые хорошо согласуются по форме импульса и порядку измеренных величин. Это свидетельствует об адекватности предложенной физико-математической модели.

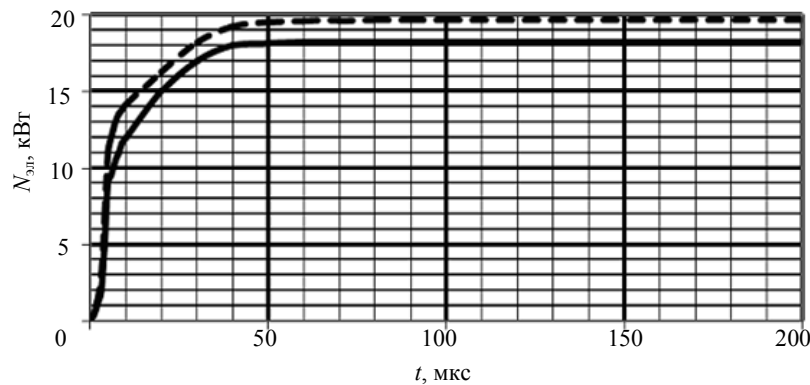


Рис. 2. Переходные характеристики электрической мощности, поступающей в импульсную ксеноновую лампу: пунктирная – расчетная кривая; сплошная – экспериментальная кривая

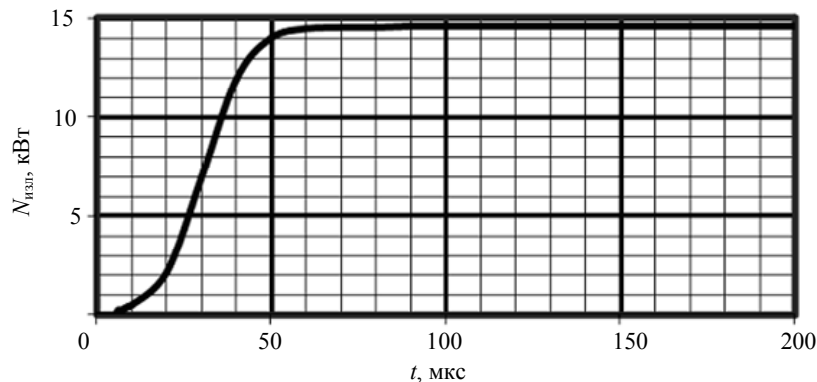


Рис. 3. Расчетная переходная характеристика мощности излучения импульсной ксеноновой лампы

На рис. 3 приведена расчетная переходная характеристика  $N_{изл}(t)$  в процессе формирования импульса накачки, рассчитанная по уравнениям (11), (15) и (8) при тех же вышеуказанных значениях параметров и том же режиме работы ИКЛ. Из сопоставления расчетных переходных характеристик  $N_{эл}(t)$  и  $N_{изл}(t)$ , изображенных на рис. 2, 3, с учетом формулы (16) следует, что за длительность импульса тока накачки  $t_r = 200$  мкс электрическая энергия, поступившая в ИКЛ, составила  $W_{эл} = 3,778$  Дж, а энергия излучения ИКЛ –  $W_{изл} = 2,458$  Дж. Этому соответствует средний КПД ИКЛ  $\langle \eta_l \rangle = 0,651 = 65,1\%$ . С увеличением длительности импульса тока накачки КПД ИКЛ растет и в пределе достигает 80%.

На рис. 4 приведены экспериментальная и расчетная переходные характеристики нормированных мощностей излучения ИКЛ  $\| N_{изл} \|$  относительно их амплитудных величин. Расчетная переходная характеристика нормированной мощности излучения ИКЛ построена по уравнениям (11), (15) и (8) при вышеуказанных значениях параметров и режиме работы, а экспериментальная переходная характеристика нормированной мощности излучения ИКЛ снята с фотодиода VD1. Как видно из рис. 4, расчетная и экспериментальная кривые хорошо согласуются как по форме, так и по порядку измеренных величин.



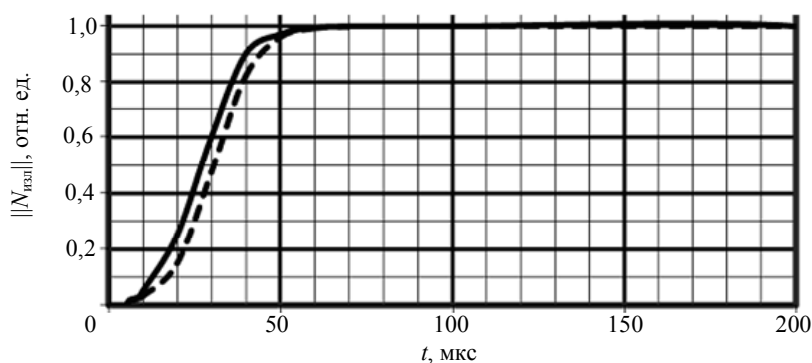


Рис. 4. Переходные характеристики нормированной мощности излучения импульсной ксеноновой лампы: пунктирная – расчетная кривая; сплошная – экспериментальная кривая

### Заключение

- В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований:
- показано, что при работе импульсной ксеноновой лампы в электрической схеме накачки на основе модулятора с частичным разрядом накопительной емкости с коммутирующим IGBT-транзистором ток накачки в лампе ограничен параметрами самой лампы;
  - представлен анализ физических процессов в импульсной ксеноновой лампе при работе в режиме ограничения тока накачки параметрами самой лампы;
  - построена физико-математическая модель процесса формирования плазменного канала в импульсной ксеноновой лампе в течение импульса тока накачки при ограничении тока самой лампой;
  - определен средний коэффициент полезного действия преобразования электрической энергии, поступившей в импульсную ксеноновую лампу за длительность импульса тока накачки, в энергию излучения ее при ограничении тока самой лампой;
  - показано, что на стадии увеличения температуры равновесного плазменного канала ксеноновая плазма насыщается собственным излучением, поэтому на стадии поддержания температуры равновесной плазмы средний спектральный относительный коэффициент излучения плазменного канала достигает максимальной величины, которая составляет сотые доли относительных единиц.

### Литература

1. Мандрыко Ю.А., Тогатов В.В. Исследование физических процессов в импульсной ксеноновой лампе при ограничении тока накачки внешней электрической цепью // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 6 (76). – С. 28–34.
2. Мак А.А., Яшин В.Е., Сомс Л.Н., Фромзель В.А. Лазеры на неодимовом стекле. – М.: Наука, 1990. – 288 с.
3. Маршак И.С. Импульсные источники света. – М.: Энергия, 1978. – 472 с.
4. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
6. Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. – М.: Наука, 1980. – 415 с.
7. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990. – 591 с.
8. Радциг А.А., Смирнов Б.М. Справочник по атомной и молекулярной физике. – М.: Атомиздат, 1980. – 240 с.
9. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – 2-е изд. – М.: Наука, 1966. – 688 с.
10. Глушко В.П., Гурвич Л.В. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. – Т. 1. – М.: Наука, 1978. – 328 с.
11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 721 с.

- Мандрыко Юрий Анатольевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, старший преподаватель, mandryko1@rambler.ru
- Тогатов Вячеслав Вячеславович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, v.togатов@mail.ru