

УДК 537.5

Предельные излучательные характеристики импульсной ксеноновой лампы ИНП-16/580

08, август 2012

Макарчук А.А.

Студент

Кафедра «Плазменные энергетические установки»

Научный руководитель: Камруков А.С.,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки»

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Макар_91@mail.ru

Импульсная лампа - газоразрядный прибор, предназначенный для получения импульсов интенсивного оптического излучения с помощью сильноточного импульсного разряда в газах.

В настоящее время импульсные лампы широко применяются в измерительной технике (стробоскопы), световой сигнализации (импульсные маяки, бортовые самолетные огни), фотохимии (флэш-фотолиз), экологии (очистка и обеззараживание воды, воздуха, твердых смесей, поверхностей и т.п.), в медицине (импульсная оптическая терапия) и др. Однако, наряду с вышеперечисленными областями применения, по-прежнему актуальной остается оптическая накачка лазеров. Высокоэнергетические ступени всех современных лазерных установок на неодимовом стекле, предназначенных для решения проблем лазерного термоядерного синтеза, построены на использовании мощных импульсных ксеноновых ламп.

Из того, что основное назначение данной лампы - накачка мощных лазеров можно сделать несколько важных выводов.

Во-первых, данная лампа работает в режиме одиночных или редко повторяющихся импульсов и приемлемый для нее с технологической точки зрения ресурс составляет порядка 10000 вспышек.

Во-вторых, для нее принципиальна не только полная энергия вспышки, но и предельные значения излучательных и энергетических характеристик, достигаемых в течение каждой вспышки. На рис.1 представлено характерное распределение электрической мощности вкладываемой в плазму, по времени разряда. Площадь под графиком численно равна энергии вспышки, но очевидно, что при одной и той же полной энергии вспышки можно получить различные максимальные энергетические (а значит и излучательные) характеристики, в зависимости от выбранного режима работы и длительности вспышки.

Целью расчета было вычисление предельных излучательных характеристик лампы при обеспечении ресурса $N = 10000$ вспышек. В качестве исходных данных для расчета были выбраны: $d = 16$ мм – внутренний диаметр кварцевой колбы, $D = 21$ мм – наружный диаметр кварцевой колбы, $l = 580$ мм – длина межэлектродного промежутка,

$p_0 = 400$ мм. рт. ст., $U_0 = 5$ кВ – рабочее напряжение лампы (при $U = 6$ кВ наступает самопробой лампы). Для обеспечения высоких мощностных характеристик излучения яркостная температура T_j задавалась на уровне не ниже 10000 К.

На первом этапе расчета определено время импульса на полувысоте $\tau_{0.5}$, энергия вспышки W_0 и требуемая емкость конденсаторной батареи C .

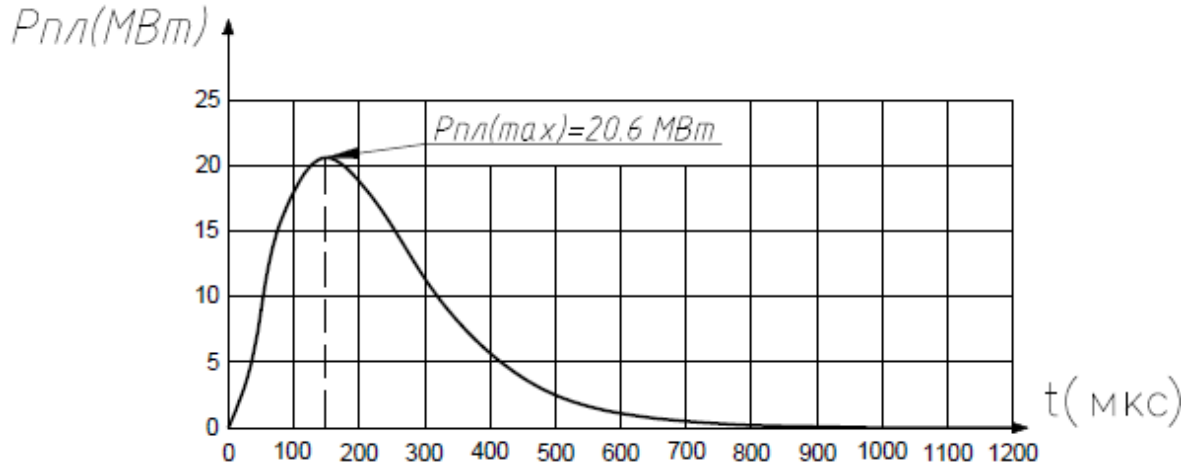


Рис.1. Электрическая мощность, вкладываемая в лампу

Полуэмпирическая связь между фактором нагрузки β и ресурсом лампы в числе вспышек N имеет вид [1]

$$\beta = N^{-1/8.5}, \quad (1)$$

тогда $\beta = 0.34$ при $N = 10000$ импульсов. Фактор нагрузки может быть выражен через яркостную температуру, эта зависимость имеет вид [1]:

$$\beta = 22 \cdot \left(\frac{T_j}{10000}\right)^4 \cdot \sqrt{\tau_{0.5}}, \quad (2)$$

откуда определена длительность импульса на полувысоте $\tau_{0.5} = 240$ мкс. Поверхностная плотность электрической мощности P_s (в Вт/см²) связана с яркостной температурой T_j эмпирической формулой [1]

$$P_s = \left(\frac{T_j}{570}\right)^4, \quad (3)$$

откуда вычислено $P_s = 9.5 \cdot 10^4$ Вт/см². Через поверхностную плотность электрической мощности найдена электрическая энергия вспышки

$$W_0 = \pi \cdot d \cdot l \cdot \tau_{0.5} = 6.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}. \quad (4)$$

Зная энергию вспышки W_0 и рабочее напряжение U_0 , можно найти требуемую емкость конденсаторной батареи

$$C = \frac{2 \cdot W_0}{U_0^2} = 523 \text{ мкФ}. \quad (5)$$

В дальнейших расчетах принята емкость $C = 500$ мкФ. Для данной емкости были уточнены энергия вспышки $W_0 = 6.25 \cdot 10^3$ Дж, длительность импульса излучения на полувысоте $\tau_{0.5} = 210$ мкс, поверхностная плотность электрической мощности $P_s = 10^5$ Вт/см² и яркостная температура $T_j = 10100$ К.

Следующим этапом расчета являлась оптимизация электротехнического контура. Разрядный контур заменялся эквивалентным контуром, показанным на рис.2.

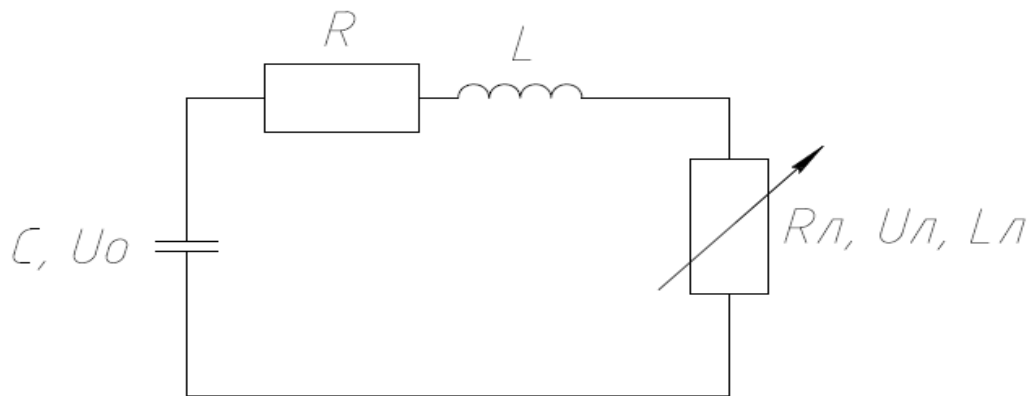


Рис.2. Эквивалентная электрическая схема разрядного контура

Импульсная лампа является нелинейным элементом. Падение напряжения на лампе $U_{\text{л}}$ и ток в ней I связаны соотношением $U_{\text{л}} = K_0 \cdot I^{1/2}$, где K_0 – конструктивный параметр лампы, зависящий от ее размеров l и d , а также начального давления ксенона в лампе P_0 . Оптимизация электротехнического контура состояла в том, что бы варьированием дополнительной индуктивности добиться режима критического затухания. Волновое сопротивление контура Z_0 определяется как $Z_0 = \sqrt{\frac{L_{\Sigma}}{C}}$, где L_{Σ} – полная индуктивность разрядного контура, включая катушку дополнительной индуктивности. Форма разрядного тока определяется параметром затухания $\gamma = R_{\Sigma}/2 \cdot Z_0$. В режиме критического затухания, когда $\gamma = 1$ ток имеет колоколообразную форму и в процессе разряда не меняет знак (рис.3). Этот режим является оптимальным для электротехнических контуров запитки импульсных ксеноновых ламп. При таком режиме достигаются наибольшие пиковые мощности, а также отсутствует отрицательная полуволна тока, существенно уменьшающая ресурс лампы.

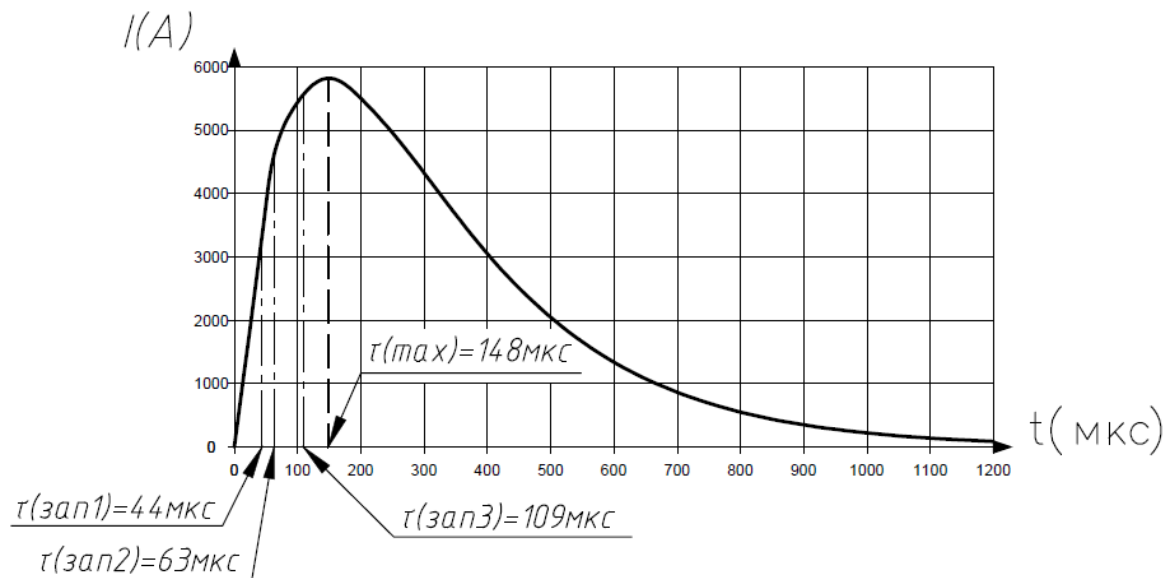


Рис.3. Разрядный ток. Время заполнения лампы

В результате проведенной оптимизации электротехнического контура определены: полное сопротивление контура $R_{\Sigma} = 0.65$ Ом, дополнительная индуктивность $L_{\Sigma} = 32$ мкГн, полная индуктивность электротехнического контура с лампой $L_{\Sigma} = 46$ мкГн. Максимальное значение тока составляет [1] $I_{\text{max}} = 0.368 \cdot U_0 / Z_0 = 5.8$ кА и достигается в момент времени $\tau_m = 2 \cdot L_{\Sigma} / R_{\Sigma} = 150$ мкс. (рис.3).

Знание тока в лампе позволяет рассчитать температуру плазмы. В установившемся режиме температуру плазмы рассчитывают по следующей эмпирической формуле:

$$T_{пл} = 3.5 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{S}{p_0}\right)^{1/16} \cdot j^{1/4}, \quad (6)$$

где S – площадь сечения лампы, j – плотность тока. Температура плазмы в максимуме тока составляет $T_{пл} = 13600$ К.

Установившийся режим реализуется при условии того, что в основной стадии процесса канал лампы заполнен плазмой. Время заполнения оценивалось несколькими методами: по формуле Андреева $\tau(\text{зап1})$, по эмпирической формуле $\tau(\text{зап2})$ и по автотомодельной теории $\tau(\text{зап3})$. Результаты представлены на рис.3. Очевидно, что не зависимо от того какой расчетной методикой пользоваться, время заполнения канала лампы плазмой меньше чем время достижения максимума тока τ_m , т.е канал лампы заполнен.

По известной температуре плазмы и суммарному числу тяжелых частиц в ней n_Σ (которое определяется начальным давлением) рассчитывался ионизационный состав плазмы. В предположении наличия локального термодинамического равновесия ионизационный состав плазмы определяется уравнением Саха. В результате его решения получено: $\alpha = 0.22$ – степень ионизации плазмы, $n_e = 2.9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ – концентрация электронов в плазме.

Ионизационный состав плазмы и ее температура позволяют рассчитать давление плазмы. Оно определяется суммой парциальных давлений атомов ионов и электронов (кулоновской поправкой и давлением излучения пренебрегаем в силу их относительной малости) $p = k \cdot T_{пл} \cdot n_\Sigma \cdot (1 + \alpha) = 3 \text{ МПа}$. Оценка разрывного давления для исследуемой лампы:

$$p_{\text{разр}} = \frac{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D}{d}\right)^2 + 1} \sigma = 15.9 \text{ МПа}, \quad (7)$$

где $\sigma = 600 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – разрывное напряжение для кварца, показывает, что давление плазмы в 5 раз меньше расчетного разрывного давления. Стоит отметить, что реальные разрывные давления, всегда меньше, чем рассчитанные по этой формуле. Снижение прочности связано с концентрацией напряжений в местах спайки фольги с кварцевой колбой (при использовании фольгового ввода, как в нашем случае).

На заключительном этапе расчета были определены излучательные характеристики лампы. Этот расчет выполнялся двумя методами. В одном из них коэффициенты поглощения определялись по эмпирической зависимости [3], во втором по теории Бибермана-Нормана-Андреева [1], учитывающей фотоионизационное, обратно -тормозное поглощение плазмы и эффекты неидеальности плазмы.

Результат расчета представлен на рис.4. Как можно видеть, два метода расчета дают близкие результаты в коротковолновой области, а в длинноволновой области расчет с использованием теоретических коэффициентов поглощения дает заниженные (по сравнению с эмпирической зависимостью) результаты. Такое различие может быть связано с тем, что формула Бибемана-Нормана-Андреева учитывает только поглощение в непрерывном спектре и не учитывает излучение в линиях, в то время как эмпирическое выражение охватывает интегрально все процессы поглощения.

Максимум спектральной силы излучения лежит в ультрафиолетовой области с центром на длине волны $\lambda \approx 320 \text{ нм}$ и составляет $I_{\lambda \text{max}} \approx 4400 \text{ Вт/нм}\cdot\text{ср}$.



Рис.4. Спектральная сила излучения

Эффективная полуширина расчетных спектров излучения составляет $\Delta\lambda_{0.5} = 330$ нм, что дает интегральную по спектру силу излучения лампы $I = \Delta\lambda_{0.5} \cdot I_{\lambda\max} = 9.8 \cdot 10^5$ Вт/ср.

Эффективный телесный угол лампы был принят равным π^2 (равнояркий цилиндр с неизлучающими торцами), откуда получена расчетно-теоретическая оценка пиковой мощности излучения лампы $P_{\text{изл}} = \pi^2 \cdot I_{\lambda\max} = 9.6$ МВт. Принимая эффективную длительность импульса излучения приблизительно равной характерному времени энерговклада $\tau_{0.5}$, можно оценить энергию и интегральный КПД излучения: $E_{\text{изл}} = P_{\text{изл}} \cdot \tau_{0.5} = 2 \cdot 10^3$ Дж, $\eta_{\text{изл}} = E_{\text{изл}}/W_0 = 0.33$.

В результате данной работы была проведена оптимизация электротехнического контура исследуемой лампы, вычислены температура плазмы, давление, ионизационный состав и излучательные характеристики.

Литература

- 1) Инженерные методы расчета импульсных ксеноновых ламп / А.С. Камруков, А.И. Кулебякина-М: ООО НИЦ "Инженер", 2010 г.
- 2) Импульсные источники света / И.С. Маршак, А.С. Дойников, В.П. Жильцов [и др.] 2-е изд. перераб. и доп.-М.: Энергия, 1978 г.
- 3) Основы расчета импульсных ксеноновых ламп / С.И. Андреев, Н.Ф. Ивасенко-Томск: Изд-во Томского ун-та, 1982 г.