

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАЗРЯДНОГО КОНТУРА В СХЕМЕ ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ КСЕНОНОВЫХ ЛАМП НАКАЧКИ СИЛОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

В. В. Свиридов, А. Г. Арзев, И. В. Галахов, В. А. Осин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Таблица 1

В 80-х–90-х годах в США, Японии, Франции и России были созданы мощные лазерные установки, имеющие суммарную выходную лазерную энергию несколько десятков килоджоулей при длительности импульса порядка одной наносекунды. Эти установки были созданы в рамках национальных программ лазерного термоядерного синтеза. На них были выполнены программы исследований по широкому кругу вопросов. Проведенные эксперименты и расчетно-теоретические исследования позволили определить, что для зажигания мишеней непрямого облучения требуется уровень лазерной энергии ~2 МДж. Развитие лазерных технологий поставило на реальную основу возможность создания таких установок. В США и Франции в настоящий момент активно разрабатываются мощные Nd лазерные установки (NIF и LMJ) с планируемой выходной энергией около 2 МДж при длине волны излучения 0,35 мкм [2, 3].

В России в конце 90-х годов был разработан проект Nd лазерной установки «Искра-6» [1] – 128 лучевого лазера с выходной энергией около 600 кДж при длине волны излучения 0,35 мкм. В настоящее время проект перерабатывается, и установка нового поколения будет иметь значительно большую лазерную энергию.

Во всех крупных установках накачка неодимового стекла осуществляется импульсными ксеноновыми лампами. Электрическая энергия, необходимая для питания ламп, запасается в конденсаторной батарее. Основные параметры конденсаторных батарей созданных и проектируемых неодимовых лазерных установок показаны в табл. 1.

Опыт работы крупных лазерных установок показывает, что конденсаторная батарея должна строиться как модульная структура. Это позволяет реализовать различные режимы работы установки и дает возможность наиболее оптимально согласовать накопитель энергии с системой импульсных ксеноновых ламп – нагрузкой, имеющей распределенный характер. При этом под модулем конденсаторной батареи мы понимаем группу конденсаторов, разряжаемых на нагрузку через один управляемый разрядник.

В ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ создан стенд, являющийся прототипом модуля конденсаторной батареи установки «Искра-6». На стенде проводились экспериментальные исследования характеристик разрядного контура, отработка элементной базы и схемных решений модуля. Основные характеристики стенда представлены в табл. 2.

| Установки                              | NIF, США                   | LMJ, Франция               | «Искра-6», Россия |
|--|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| Энергия, запасаемая в ЕНЭ, МДж         | 387                        | 450                        | 215               |
| Зарядное напряжение ЕНЭ, кВ            | 24                         | 24                         | 24                |
| Время разряда ЕНЭ, мкс                 | 360                        | 360                        | 360               |
| Число модулей, шт.                     | 192                        | 540                        | 256               |
| Пиковый ток через один коммутатор, кА  | 500                        | 250                        | 250               |
| Количество ламп накачки, шт.           | 7680                       | 10800                      | 5120              |
| Количество разрядных контуров, шт.     | 3840                       | 5400                       | 2560              |
| Амплитуда тока в разрядном контуре, кА | 25                         | 25                         | 25                |
| Тип коммутатора                        | Искровой высокого давления | Искровой высокого давления | РВД               |

Таблица 2

|   |       |
|---|-------|
| Зарядное напряжение, кВ                           | 22–24 |
| Энергия, запасенная в модуле, кДж (при 24 кВ)     | 835   |
| Количество ламповых контуров на модуль            | 10    |
| Максимальный разрядный ток в ламповом контуре, кА | 29    |
| Максимальный разрядный ток в модуле, кА           | 290   |
| Суммарный ток разряда, МА                         | 74    |
| Время разряда, мкс                                | 360   |

Электрическая схема высоковольтного испытательного стенда представлена на рис. 1. Схема представляет собой десять параллельных ламповых контуров, разряжаемых через один управляемый разрядник. Каждый контур содержит конденсатор, формирующую индуктивность, кабельную линию и две последовательно соединенные импульсные ксеноновые лампы. Основные характеристики ламп ИНП40/1600, используемых в качестве нагрузки модуля, представлены в табл. 3.

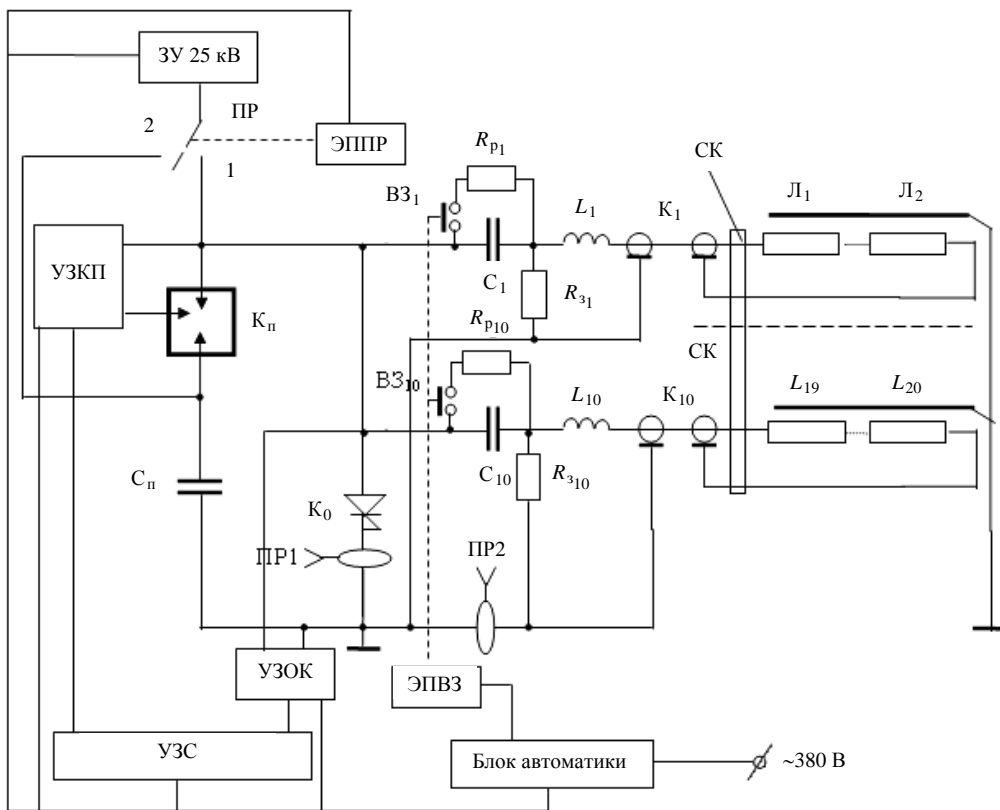


Рис. 1. Принципиальная схема высоковольтного испытательного стенда

Обозначения на схеме:  $C_1-C_{10} \approx 290$  мкФ – накопительные емкости модуля;  $R_{31}-R_{310} = 1$  кОм – зарядные резисторы;  $R_{p1}-R_{p10} = 5$  кОм – разрядные резисторы; ВЗ<sub>1</sub>–ВЗ<sub>10</sub> – контакты высоковольтного замыкателя; ЭПВЗ – электропривод высоковольтного замыкателя, К<sub>0</sub> – основной коммутатор модуля (КРД25-300);  $C_{п} \approx 60$  мкФ – конденсатор предыонизации; К<sub>п</sub> – коммутатор предыонизации; К<sub>1</sub>–К<sub>10</sub> – ка-бельные линии; L<sub>1</sub>–L<sub>10</sub> – формирующие индуктивности; L<sub>1</sub>–L<sub>20</sub> – импульсные лампы; СК – соединительная коробка; УЗОК – устройство запуска основного коммутатора; УЗКП – устройство запуска коммутатора предыонизации; УЗС – устройство запуска синхронизации; ПР – переключатель режимов; ПР1–ПР2 – пояса Роговского; ЭППР – электропривод переключателя режимов; ЗУ – зарядное устройство.

определение в контуре параметров разрядного тока, мощности, энергии, выделяющейся в лампах, кпд контура, фактора нагрузки ламп и сравнение полученных результатов с расчетными.

Измерения проводились при разных зарядных напряжениях: 18, 20, 22 и 24 кВ. В ходе испытаний с помощью пояса Роговского фирмы Pearson Electronics, модель 1423, и делителей напряжения Tektronix P6015A измерялся разрядный ток в контуре  $I_{л}$  и падение напряжения на лампах  $U_{л}$ . Для регистрации сигналов использовался осциллограф Tektronix 3014 В. На основе этих измерений были вычислены: плотность тока в лампах, энергия  $E_{л}$ , мощность  $P$  разряда ламп, удельная мощность  $P_y$ , кпд контура  $\eta$ , фактор нагрузки  $f_x$

$$P = U_{л}(t)I_{л}(t);$$

$$j = \frac{I_m}{S}, P_y = \frac{P}{V};$$

$$\eta = \frac{E_{л}}{E_3}, f_x = \frac{E_{л}}{E_x};$$

$$E_{л} = \int_0^{tu} U_{л}(t)I_{л}(t)dt,$$

Был проведен цикл исследований единичного разрядного контура для двух ламп ИНП40/1600, соединенных последовательно. Цель исследований –

где  $S$  и  $V$  – площадь поперечного сечения и объем лампы;  $E_3$  – запасенная энергия;  $E_x$  – энергия взрыва лампы.

Таблица 3

|                                       |      |
|---------------------------------------|------|
| Внутренний диаметр лампы, см          | 4    |
| Длина разрядного промежутка лампы, см | 160  |
| Давление ксенона в лампе, Торр        | 100  |
| Общее количество ламп в установке     | 5120 |

Типичные осциллограммы импульса разрядного тока, падения напряжения, зависимости энергии и мощности разряда при зарядном напряжении на конденсаторе 24 кВ показаны на рис. 2 и 3. Основные параметры разряда при зарядных напряжениях ( $U_0$ ) 18, 20, 22 и 24 кВ приведены в табл. 4.

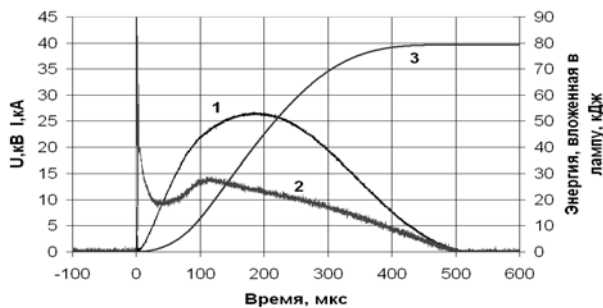


Рис. 2. Осциллограмма тока в контуре (1), напряжения на лампах (2), энергии, выделяемой в лампах (3), при зарядном напряжении 24 кВ

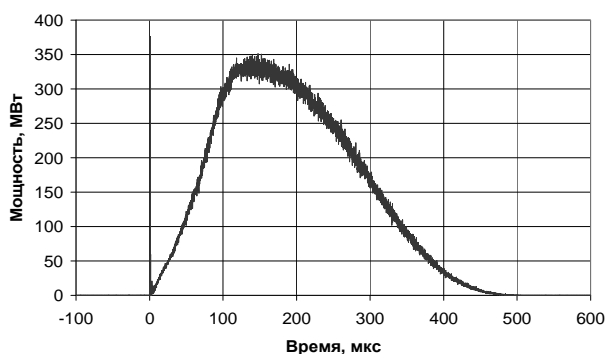


Рис. 3. Осциллограмма мощности разряда при зарядном напряжении на конденсаторе 24 кВ

Таблица 4

Основные параметры разряда, полученные на основе эксперимента

| $U_0$ , кВ | Плотность тока, $A/m^2$ | Амплитуда мощности, МВт | Длительность мощности по уровню 0,1, мкс | Энергия, выделившаяся в лампах, кДж | Кпд контура, % | Фактор нагрузки |
|------------|-------------------------|-------------------------|--|-------------------------------------|----------------|-----------------|
| 18         | 1472                    | 197                     | 378                                      | 45                                  | 92             | 0,16            |
| 20         | 1671                    | 236                     | 374                                      | 54                                  | 91             | 0,19            |
| 22         | 1831                    | 278                     | 371                                      | 65                                  | 90             | 0,23            |
| 24         | 2125                    | 330                     | 379                                      | 79                                  | 91             | 0,28            |

В ходе проведения экспериментальных исследований на стенде отработывалась методика расчета разрядного контура в пакете программ OrCad-9.2. Для расчета была разработана модель разрядного контура, включающая нелинейные элементы, такие, как импульсные лампы. Результаты расчета тока и мощ-

ности при разряде модуля конденсаторной батареи установки «Искра-6» приведены на рис. 4, 5 и в табл. 5.

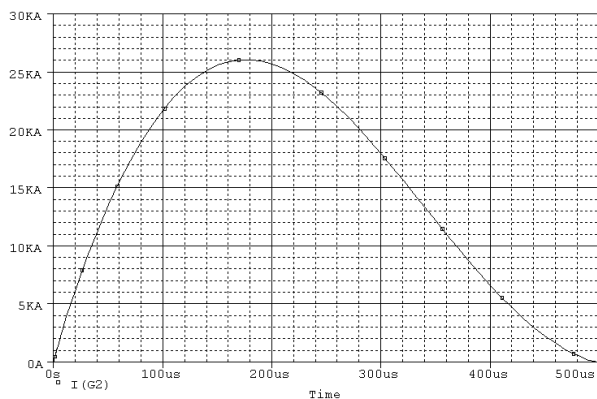


Рис. 4. Расчетный ток в разрядной цепи модуля конденсаторной батареи установки «Искра-6». Зарядное напряжение 24 кВ

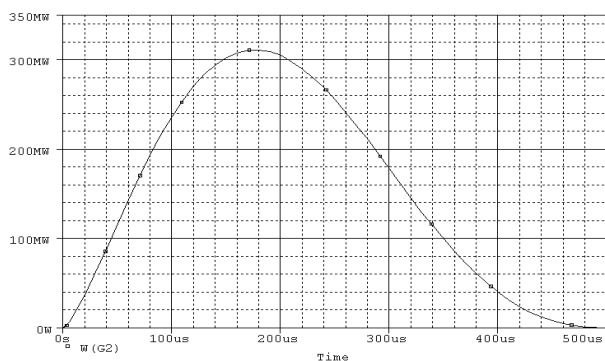


Рис. 5. Расчетная мощность в разрядной цепи модуля конденсаторной батареи установки «Искра-6» при зарядном напряжении 24 кВ

Таблица 5

Основные параметры разряда, полученные на основе расчета

| $U_0$ , кВ | Плотность тока, $A/m^2$ | Амплитуда мощности, МВт | Длительность мощности по уровню 0,1, мкс | Энергия выделяющаяся в лампах, кДж | Кпд контура, % | Фактор нагрузки |
|------------|-------------------------|-------------------------|--|------------------------------------|----------------|-----------------|
| 18         | 1409                    | 176                     | 391                                      | 44                                 | 92             | 0,16            |
| 20         | 1624                    | 218                     | 387                                      | 54                                 | 91             | 0,19            |
| 22         | 1847                    | 262                     | 384                                      | 65                                 | 90             | 0,23            |
| 24         | 2070                    | 315                     | 382                                      | 78                                 | 90             | 0,28            |

Из сравнения результатов моделирования с осциллограммами, полученными в реальных экспериментах (см. табл. 4 и 5), видно, что расчетная модель довольно точно описывает процессы, проходящие в ламповом контуре (расхождение характеристик не превышает 5%), и данный метод можно применять для расчета характеристик разрядного контура установки нового поколения.

В преддверии создания лазерной установки нового поколения одной из важнейших задач является определение основных характеристик разрядного контура модуля конденсаторной батареи для другого типа ламп. Предполагается, что в установке будут использоваться лампы типа ИНП45/1950 с длиной разрядного промежутка  $l = 195$  см, внутренним диаметром колбы  $d = 4,5$  см и давлением ксенона  $p \sim 90$  Торр. Длительность импульса тока разряда составляет  $3\sqrt{LC} = 360$  мкс. Лампы будут работать при максимально вкладываемой энергии  $E_{л} \leq 0,25E_x$  (фактор нагрузки  $f_x = 0,25$ ), где  $E_x$  – энергия, разрушающая лампу в одиночном срабатывании:

$$E_x \cong 2 \cdot 10^4 l d \sqrt{\tau},$$

где  $l$  – длина разрядного промежутка (в см);  $d$  – внутренний диаметр лампы (в см),  $\tau = (LC)^{1/2}$  – длительность импульса разрядного тока (в с). Таким образом, для данного типа ламп предельная энергия составляет  $E_x = 192$  кДж. Тогда максимально допустимая энергия, вложенная в лампу, составит  $E_{л} = 48$  кДж, а двум последовательно соединенным лампам надо доставить энергию  $E_{л} = 96$  кДж. Если предполагать, что КПД передачи энергии из конденсаторов в лампы составит  $\geq 80\%$ , то энергия, запасаемая в конденсаторах, будет равна  $E_3 = E_{л}/0,8 = 120$  кДж.

Основные характеристики контура рассчитывались для режима разряда, близкого к критическому (коэффициент затухания  $\alpha = 0,75$ ), по методике [4], представляющей лампу нелинейным резистором с вольт-амперной характеристикой:

$$U = K_0 \sqrt{i},$$

где

$$K_0 = 1,36 \frac{l}{d} \left( \frac{p}{450} \right)^{0,18},$$

где  $l$  и  $d$  – длина между электродами и внутренний диаметр колбы лампы (в см);  $p$  – давление ксенона в лампе (в Торр). Для лампы ИНП45/1950  $K_0 = 84$ .

Исходя из запасенной энергии  $E_3 = 120$  кДж, длительности импульса  $\tau = (LC)^{1/2} = 120$  мкс и режима разряда (коэффициент затухания  $\alpha = 0,75$  – режим разряда, близкий к критическому), были произведены оценочные расчеты емкости, индуктивности и зарядного напряжения контура [4]

$$C_0^3 = \frac{2E_3 \alpha^4 \tau^2}{K_0^4}, \quad U_0 = \sqrt{\frac{2E_3}{C_0}}, \quad L = \frac{\tau^2}{C_0}.$$

Величина емкости составила  $C_0 = 280$  мкФ, напряжения и индуктивности  $U_0 = 29$  кВ,  $L = 51$  мкГ соответственно.

Одними из важных характеристик разрядного контура являются плотность тока  $j$  и удельная мощность  $P_{уд}$ , выделяемая в лампах. Именно эти харак-

теристики определяют основные световые параметры ламп. Из [5] известно, что в установке  $NIF j = 1715$  А/м<sup>2</sup>,  $P_{уд} = 59$  кВт/см<sup>3</sup>. Эти значения считаются оптимальными для неодимовой лазерной установки, такие же данные были получены и с помощью моделирования в пакете программ OrCad-9.2. На рис. 6 представлен расчет мощности, выделяемой в лампах установки NIF. Для расчета использовались следующие параметры контура:  $C_0 = 300$  мкФ,  $U_0 = 24$  кВ,  $L = 50$  мкГ,  $R = 68$  мОм (активные потери в контуре),  $K_0 = 79$ . Полученные результаты: максимальное значение мощности  $P = 310$  МВт, длительность по уровню 0,1  $T = 393$  мкс. На рис. 7 представлена осциллограмма мощности установки NIF, основные параметры: амплитуда  $P = 304$  МВт, длительность по уровню 0,1  $T = 394$  мкс.

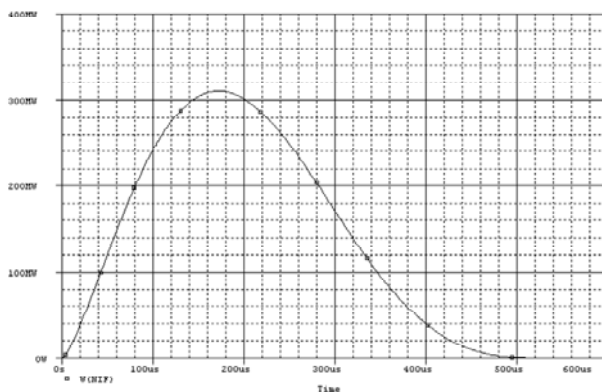


Рис. 6. Расчет мощности установки NIF

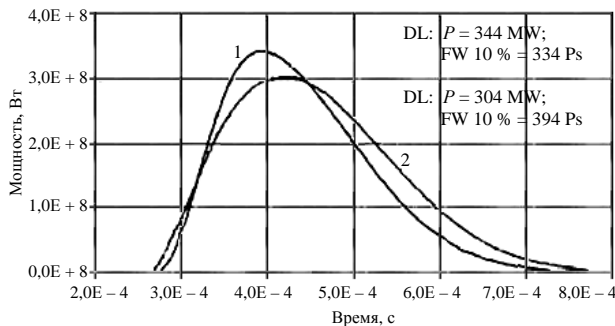


Рис. 7. Осциллограмма мощности в эквивалентной (1) и ламповой (2) нагрузках установки NIF

Видно, что расчет довольно точно совпадает с экспериментом, что свидетельствует о правильно выбранной методике расчета.

Отправной точкой расчета разрядного контура, содержащего лампы ИНП45/1950, в пакете программ OrCAD служили оценочные характеристики контура ( $C_0 = 280$  мкФ,  $U_0 = 29$  кВ,  $L = 51$  мкГ), величина длительности импульса мощности по уровню 0,1  $T = 394$  мкс, плотность тока  $j = 1715$  А/м<sup>2</sup>, удельная мощность  $P_{уд} = 59$  кВт/см<sup>3</sup>, выделяемая в лампах,

Результаты расчета разрядного контура с лампами ИНП45/1950

| №  | $U_0$ , кВ | $C_0$ , мкФ | $L$ , мкГ | $j$ , А/м <sup>2</sup> | $P_{уд}$ , кВт/см <sup>3</sup> | $T_{0,1}$ , мкс | $f_x$ |
|----|------------|-------------|-----------|------------------------|--------------------------------|-----------------|-------|
| 1  | 29         | 280         | 51        | 1887                   | 70                             | 380             | 0,273 |
| 2  | 27         | 290         | 46        | 1780                   | 65                             | 374             | 0,251 |
| 3  | 26         | 300         | 43        | 1736                   | 62                             | 374             | 0,242 |
| 4  | 25         | 300         | 43        | 1648                   | 58                             | 376             | 0,224 |
| 5  | 25         | 310         | 40        | 1695                   | 60                             | 372             | 0,234 |
| 6  | 25         | 320         | 40        | 1711                   | 61                             | 380             | 0,240 |
| 7  | 25         | 330         | 40        | 1723                   | 62                             | 386             | 0,245 |
| 8  | 25         | 340         | 40        | 1736                   | 62                             | 393             | 0,250 |
| 9  | 25         | 350         | 40        | 1755                   | 63                             | 400             | 0,255 |
| 10 | 24         | 360         | 40        | 1767                   | 64                             | 406             | 0,260 |

Наиболее полно всем условиям удовлетворяет вариант контура № 7 со следующими характеристиками:  $C_0 = 330$  мкФ,  $L = 40$  мкГ,  $U_0 = 25$  кВ. Результаты расчета тока в контуре, мощности и энергии, выделяемой в лампах этого варианта, приведены рис. 8–10. Ток в лампах имеет следующие параметры: амплитуда  $I = 27$  кА, длительность по уровню 0,1  $T = 441$  мкс. Характеристики мощности и энергии, выделяемой в лампах: амплитуда импульса мощности  $P = 382$  МВт, длительность по уровню 0,1  $T = 386$  мкс, энергия  $E = 92$  кДж

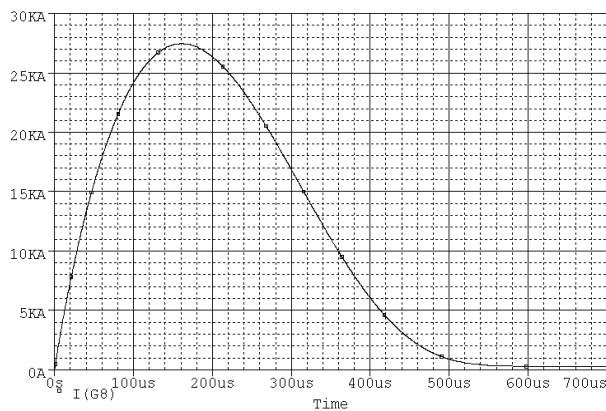


Рис. 8. Разрядный ток в ламповой цепи

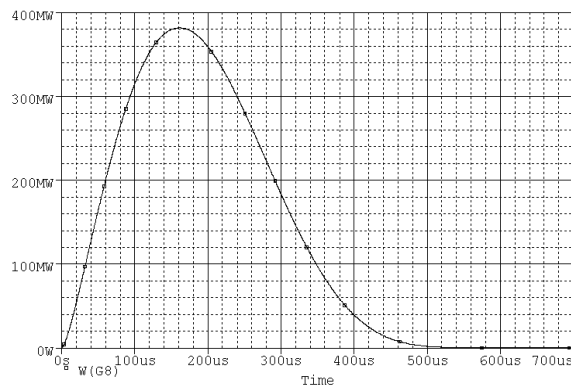
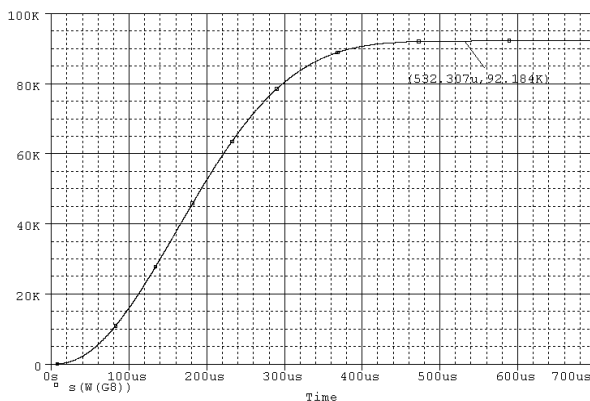


Рис. 9. Мощность, выделяемая в лампах ИНП45/1950



### Заключение

В данной статье приведена методика расчета разрядного контура, используемого в системе импульсного питания ксеноновых ламп накачки лазеров на неодимовом стекле. Методика была протестирована в ходе экспериментальных исследований, проводимых на прототипе модуля конденсаторной батареи установки «Искра-6». С ее помощью были получены основные характеристики разрядного контура, содержащего лампы ИИП45/1950: емкость накопительного конденсатора  $C_0 = 330$  мкФ, величина формирующей индуктивности  $L = 40$  мкГ и зарядное напряжение  $U_0 = 25$  кВ.

### Литература

1. Galakhov I. V., Garanin S. G., Eroshenko V. A. et al. Concept of the Iskra-6 Nd-laser facility // Fusion Engineering and Design. 1999. Vol. 44. P. 51–56.
2. LLNL. ICF Quarterly Report. Special Issue: National Ignition Facility // Virginia: Springfield. 1997. Vol. 7, N 3.
3. Andre M. L. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 1997. Vol. 38. P. 3047.
4. Markiewicz J. P., Emmett J. L. Design of Flash-lamp Driving Circuits // JEEE Journal of Quantum Electronics. November, 1966. Vol. QE-2, N 11.
5. Smith D. L., Wilson J. M., Harjes H. C. et al. FANTM: The First Article NIF Test Module for the Laser Power Conditioning System // Proceedings of the 12th IEEE International Pulsed Power Conference. Monterey, CA, 1999. P. 921–924.