

Расчетное обоснование единой диодной нагрузки для экспериментальной установки ГАММА-4

Н. В. Завьялов, В. С. Гордеев, А. В. Гришин, А. Л. Мозговой, С. Ю. Пучагин, К. В. Страбыкин, С. Л. Глушков, С. Т. Назаренко, В. С. Павлов, В. А. Деманов

Описан вариант конструктивной схемы объединения ускорительных модулей электрофизической установки ГАММА-4 в режиме работы на единую диодную нагрузку. На базе телеграфных уравнений разработана одномерная расчетная модель установки ГАММА-4. Проведены расчеты выходных электрических характеристик установки в режиме синхронного срабатывания модулей с учетом электронных утечек в подводящих линиях. Для представленной конструкции сумматора тока с диодом получены оценки тока и напряжения на диоде, токов электронных утечек и энергии, уносимой ими из системы, а также картина установления магнитной самоизоляции в вакуумной части установки.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается четырехмодульная электрофизическая установка ГАММА-4, предназначенная для генерации импульсов тормозного излучения (ТИ) длительностью на полувывсоте ~ 50 нс [1]. На первом этапе будет реализован режим вакуумного пинч-диоода, в котором модули установки работают каждый на свою автономную нагрузку.

В данном режиме работы установки, когда четыре пинч-диоода расположены вплотную друг к другу, излучение формируется четырьмя дискретными источниками, расположенными в углах квадрата со стороной 250 мм. В этом случае при расположении облучаемого объекта в ближней к излучателям зоне не удастся повысить плотность энергии излучения по сравнению с излучением одного модуля, возрастает лишь площадь облучаемой поверхности. Данный режим работы установки оптимален для облучения объектов сравнительно большой площади (приблизительно от 10^3 до 10^4 см²). Для получения плотных потоков ТИ на объектах малой площади (от ~ 10 до 10^2 см²) на установке необходимо реализовать режим, в котором модули установки работают на единую диодную нагрузку.

Один из рассматриваемых вариантов конструктивной схемы объединения модулей установки ГАММА-4 на единую диодную нагрузку представлен на рис. 1. В приведенной схеме выходы цилиндрических магнитоизолированных передающих линий (МИПЛ) четырех модулей объединяются с помощью системы электродов – сумматора тока. Сумматор тока состоит из заземленного и высоковольтного электродов, образующих МИПЛ, по которой электрический импульс транспортируется к нагрузке – вакуумному пинч-диооду.

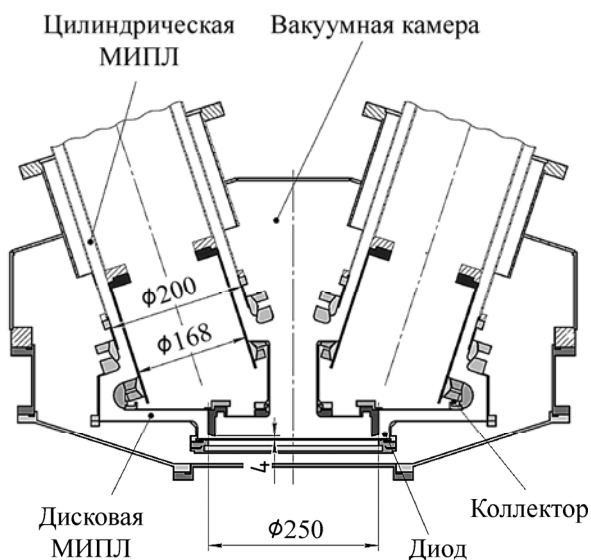


Рис. 1. Конструктивная схема объединения модулей на единую диодную нагрузку

Зависимость тока диода от напряжения на нем в установившемся режиме удовлетворительно описывается парапотенциальной моделью [2, 3]. Согласно данной модели для того, чтобы обеспечить импеданс диода, согласованный с эффективным выходным импедансом генератора 0,73 Ом, при зазоре 4 мм диод должен иметь диаметр катода ~250 мм.

Расчетная модель

На рис. 2 приведена геометрия вакуумного межэлектродного зазора центральной части установки. На рисунке не показаны ускорительные трубки и подводящие цилиндрические МИПЛ. Все элементы установки имеют аксиальную симметрию и, следовательно, легко переводятся из 3D в 1D представление с непрерывными, распределенными вдоль тракта EM волны параметрами:

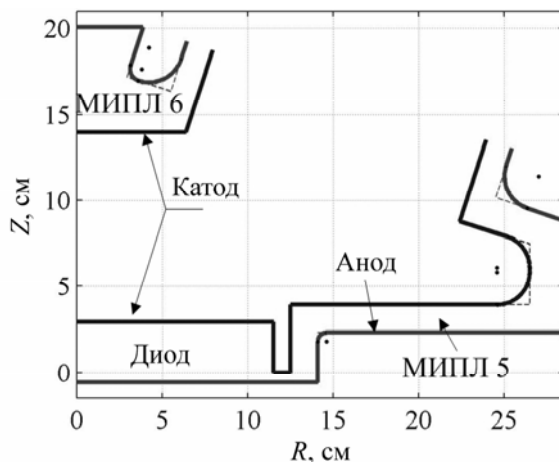


Рис. 2. Геометрия центральной части установки ГАММА-4 с сумматором тока и диодом

$L_x(x)$ – погонной индуктивностью, $C_x(x)$ – погонной емкостью и $d(x)$ – А-К зазором. Погонные индуктивность и емкость являются коэффициентами в одномерных телеграфных уравнениях, а А-К зазор необходим для вычисления плотностей токов утечек. Телеграфные уравнения в условиях рассматриваемой задачи полностью эквивалентны системе уравнений Максвелла [4].

На рис. 3 показан граф установки. На ребрах этого графа решалась система телеграфных уравнений с соответствующими граничными условиями в узлах. Система уравнений в частных производных решалась в конечных разностях на неравномерной сетке с использованием двухслойной явной акустической схемы «два креста» [5], устойчивой при выполнении условия Куранта и имеющей второй порядок сходимости как по пространственной координате, так и по времени. На этом же рисунке показаны элементы конструкции установки, их размещение на пространственной оси, связи между ними. На основании данного набора координат автоматически строится неравномерная пространственная сетка с заданными глобальными и локальными параметрами.

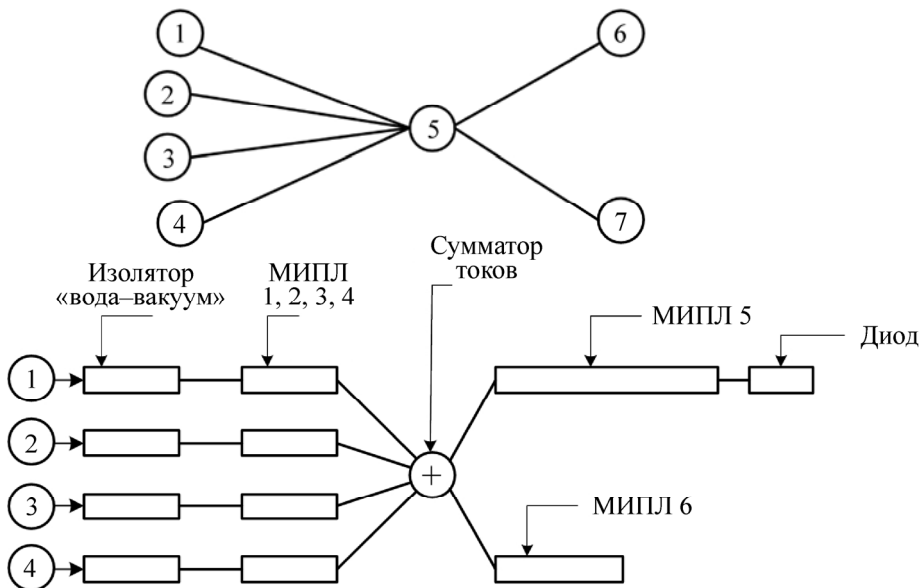


Рис. 3. Граф установки ГАММА-4 (вверху), приведенный к единой пространственной переменной (внизу)

Электронные утечки рассчитывали методом, предложенным в работе [6] для установки АНГАРА-5-1, за исключением того расчета плотностей тока утечек, для которого использовался релятивистский вариант закона Чайлда – Ленгмюра.

Пересчет трехмерных аксиально-симметричных элементов конструкции установки в одномерные модели осуществлялся следующим образом: ускорительные трубки – на основе электростатического и магнитостатического расчетов; МИПЛ 1, 2, 3, 4 – аналитическое представление; МИПЛ 5, 6 – полуаналитика (численный расчет А-К зазора вдоль катода симплекс-методом), диод – электростатический расчет. На рис. 4 приведены зависимости параметров модели $L_x(x)$, $C_x(x)$, $Z(x)$, $d(x)$ от координаты. В данном варианте установка нагружена вакуумным диодом с полым катодом, с ожидаемым импедансом, в рамках парапотенциальной модели, $Z_d \approx 1$ Ом.

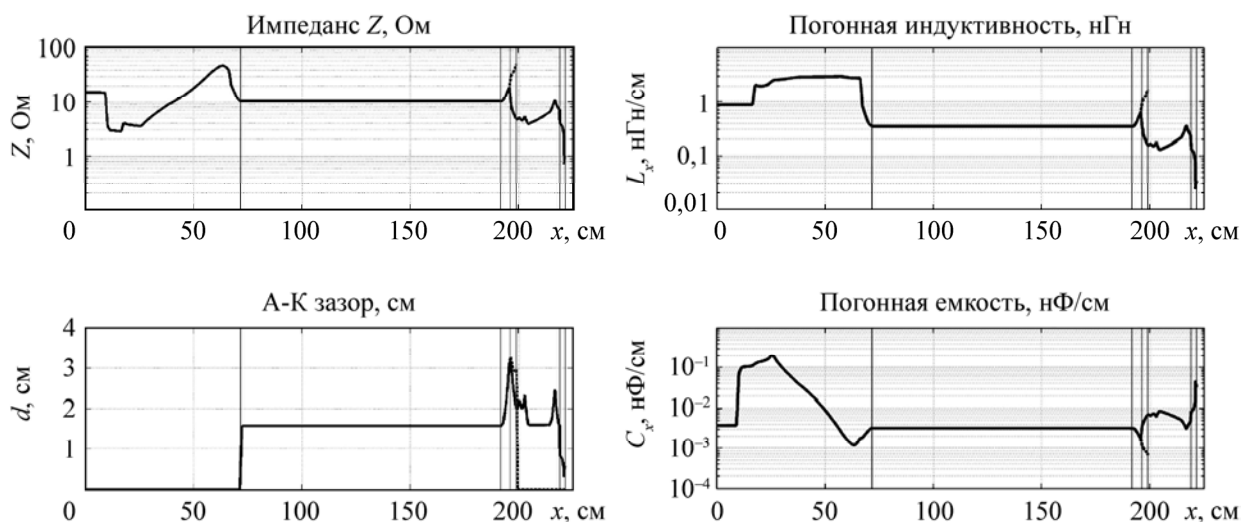


Рис. 4. Параметры одномерной модели установки. А-К зазор указан только для областей, в которых учитываются электронные утечки

Результаты расчетов

«Узких» мест в модели было всего два: стыковка граничных и начальных условий в 5-м узле – сумматоре – и малая длина МИПЛ 6 с открытым концом. Близость открытого конца МИПЛ 6 (x_3) и 5-го узла (x_2) придавала системе уравнений большую жесткость, вызывая быстрый рост неустойчивостей на данном ребре графа.

В данном расчете на четыре входных порта установки через передающие линии с импедансом 2,9 Ом синхронно падают волны напряжения. Зависимость напряжения от времени в падающей волне V_{inc} показана на рис. 5,а. Там же приведены расчетные кривые: $I_{diод}$ – ток, $U_{diод}$ – напряжение на диоде, $I_{leак}$ – суммарный ток утечек в вакуумной части установки. На рис. 5,б показаны токи утечек в каждом из шести элементов вакуумной части установки.

Значения физических величин, характеризующих эффективность работы установки, приведены в таблице.

Расчетные параметры установки

Параметр	Значение (время, нс)
Энергия, поступившая в систему, кДж	328,7 (200)
Энергия, дошедшая до диода, кДж	289,5 (200)
Энергия, унесенная электронными утечками, кДж	6,5 (200)
Максимальная мощность электромагнитного импульса на входе, ТВт	6,2 (112)
Максимальная мощность электромагнитного импульса на диоде, ТВт	4,8 (146)
Максимальный ток диода, МА	2,33 (146)
Максимальное напряжение на диоде, МВ	2,07 (146)
Максимальный суммарный ток утечек, кА	220 (76,8)
Максимальный ток утечек в МИПЛ 1, 2, 3, 4, кА	53 (75,6)
Максимальный ток утечек в МИПЛ 5, кА	10 (77)
Максимальный ток утечек в МИПЛ 6, кА	40,5 (143,2)

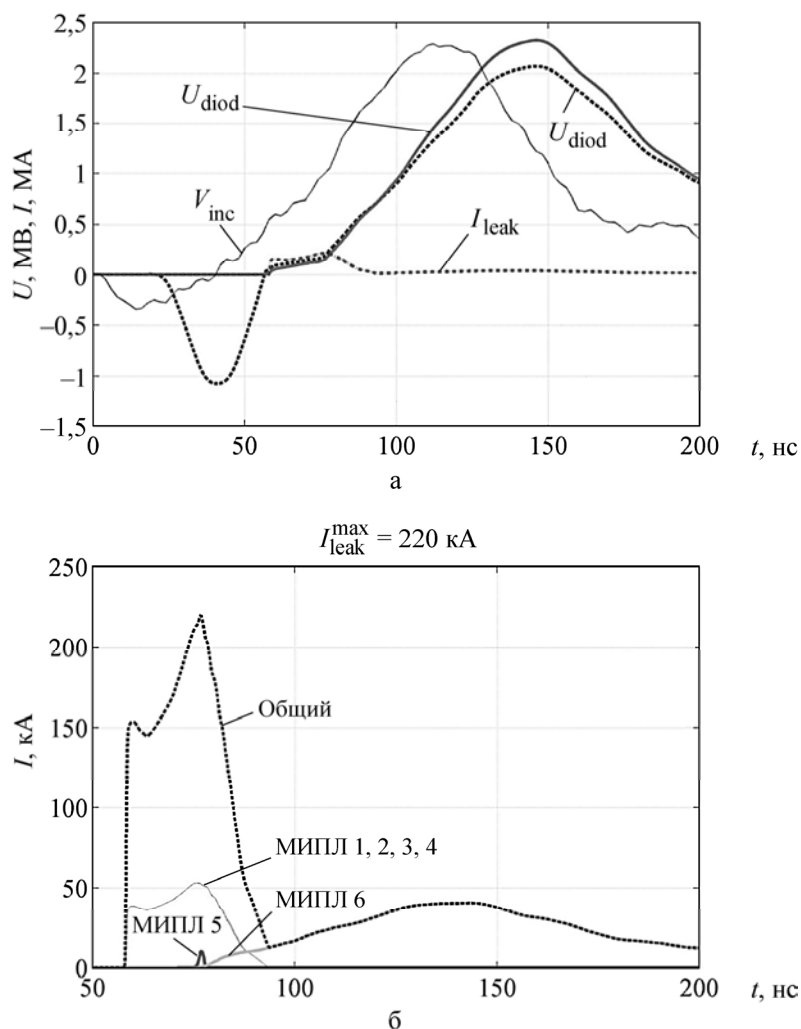


Рис. 5. Результаты расчетов работы установки ГАММА-4 с единой диодной нагрузкой

По результатам расчетов при напряжении 2,07 МВ ток диода составляет 2,33 МА, импеданс диода 0,9 Ом. Суммарный ток утечек – 220 кА, энергия, уносимая токами утечки, – 6,5 кДж (или ~2 % от энергии, поступившей в систему). В диод передается энергия 290 кДж (или 88 %).

Заключение

На базе телеграфных уравнений разработана и реализована в программном коде одномерная модель выходной части установки ГАММА-4 в режиме работы на единую диодную нагрузку. Выполнены расчеты параметров электрического импульса, передаваемого в диодную нагрузку, с учетом электронных утечек в подводящих вакуумных линиях в режиме синхронного срабатывания модулей установки. Согласно результатам расчетов в диод с импедансом 0,9 Ом передается 88 % энергии, подводимой к системе. При этом энергия, уносимая токами утечки, не превышает 2 %.

Приведенная конструктивная схема рассматривается в качестве одного из возможных вариантов объединения модулей установки ГАММА-4 на единую диодную нагрузку.

Список литературы

1. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Пунин В. Т. и др. Проект электрофизической установки ГАММА-4 // Изв. вузов. Сер. Физика. 2014. Т. 57, № 12-2. С. 176–180.
2. Creedon J. M. Relativistic Brillouin flow in high v/γ diode // J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46, N 7. P. 2946–2955.
3. Creedon J. M. Magnetic cutoff in high-current diodes // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48, N 3. P. 1070–1077.
4. Вайнштейн Л. А. Пределы применимости телеграфных уравнений // Электромагнитные волны. – М.: Наука, 1988. С. 125–130.
5. Калиткин Н. Н. Численные методы. – М.: Наука, 1982. С. 429–432.
6. Aleksandrov V. V., Grabovski E. V., Gribov A. N. et al. Transmission efficiency of an electromagnetic pulse in the vacuum concentrator of ANGARA-5-1 facility // Proc. of the 18th Int. conf. on High-Power Particle Beams. 2010. P. 436–445.

Computational Justification of the Common Vacuum Diode Load for GAMMA-4 Experimental Facility

N. V. Zavyalov, V. S. Gordeev, A. V. Grishin, A. L. Mozgovoy, S. Yu. Puchagin, K. V. Strabykin, S. L. Glushkov, S. T. Nazarenko, V. S. Pavlov, V. A. Demanov

The variant of the design map of the common vacuum diode load for the electro-physical GAMMA-4 facility is presented. On the base of telegraph equations the one-dimensional computational model of the facility has been developed. The calculations of output electrical parameters of the facility in the mode of simultaneous operation of all modules into common vacuum diode load have been performed with taking into account electron leakages in vacuum transmission lines. For the presented design of the current adder the estimations of the diode voltage and current, electron leakage currents and energy, as well as an evolution of the process of magnetic insulation in vacuum part of the facility have been obtained.