

УДК 621.3.015.333, 621.384.6

ВЛИЯНИЕ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ТОКА В ВАКУУМНОМ ДИОДЕ ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Егоров И.С., Ежов В.В., Полосков А.В.

ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, e-mail: egoris@tpu.ru

В работе приведены результаты анализа зависимости амплитуды импульсов ускоряющего напряжения от времени запаздывания тока в диоде электронного ускорителя АСТРА-М. Для построения зависимостей применялась вычислительная модель ускорителя, полученные результаты подтверждены экспериментальными данными. Определён диапазон значений импеданса диода и времени запаздывания тока в диоде, при которых изменение амплитуды генерируемых импульсов ускоряющего напряжения не превышает 5%. Установлено, что при одинаковом времени запаздывания тока в диоде амплитуда импульса мощности уменьшается с ростом импеданса диода. Для разных значений импеданса диода амплитуда импульсов мощности, развиваемой в диоде ускорителя, имеет максимум при величине запаздывания тока в диоде 125 нс. По результатам полученных закономерностей определены параметры диода ускорителя для генерации импульсного электронного пучка и инжекции его в газовую среду.

Ключевые слова: частотный ускоритель электронов, электронный диод, генератор высоковольтных импульсов

INFLUENCE OF THE CURRENT DELAY TIME IN A VACUUM DIODE OF AN ELECTRON ACCELERATOR ON THE FORMATION OF THE ACCELERATING VOLTAGE PULSES

Egorov I.S., Ezhov V.V., Poloskov A.V.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: egoris@tpu.ru

The paper analyzes the relationship between the amplitude of accelerating voltage pulse and the delay time of total diode current for the ASTRA-M pulsed electron accelerator. The regularities have been constructed with the use of a computational model of the accelerator, and then validated by experimental data. We have found the optimal values of diode impedance and current delay time that provides accelerating voltage changes less than 5%. It was shown that with the same delay times in diode current the diode power decreases with the increase in diode impedance. Maximum value of the diode power pulse has been found at 125 ns current delay time for different values of diode impedance. Obtained relationships disclose optimal parameters of the vacuum diode of the accelerator for electron beam generation and injection to a gas environment.

Keywords: high repetition rate pulsed electron accelerator, vacuum electron diode, high voltage pulse generator

Построение моделей принципиальных схем оборудования позволяет подчас выявить их ранее неустановленные свойства и характеристики, которые позже могут найти подтверждение в натурных экспериментах. Так, при экспериментальных исследованиях свойств катодов из композиционных материалов для вакуумного диода импульсного электронного ускорителя АСТРА [4] (ускоряющее напряжение до 370 кВ, длительность тока выведенного пучка 60 нс на полувысоте, энергия 4,5 Дж/имп.) было обнаружено запаздывание протекания эмиссионного тока вследствие увеличения времени формирования плазменной эмитирующей поверхности [1]. Подобное явление было также описано в [6], где увеличение времени запаздывания протекания тока сопровождалось увеличением амплитуды импульса мощности электронного пучка и увеличением КПД передачи энергии в пучок. Полученные в [1] свойства катодов использовались при построении

ускорителя АСТРА-М [9] (ускоряющее напряжение до 470 кВ, длительность тока выведенного пучка 75 нс на полувысоте, энергия 6-10 Дж/имп.), схема которого учитывает запаздывание протекания тока через вакуумный электронный диод. Возможность ускорителя генерировать и выводить в атмосферу электронный пучок с частотой следования 40 с^{-1} в долговременном режиме обеспечила успешное применение ускорителя для построения радиационных технологий [5, 7, 10].

Изучение работы принципиальной схемы генератора высоковольтных импульсов с учётом его конструктивного исполнения позволило построить вычислительную модель генератора, объективно воспроизводящую его выходные параметры для всего диапазона используемых нагрузок [8]. Анализ работы вычислительной модели генератора на резко нелинейный импеданс вакуумного электронного диода [3] позволил вычислить диапазон параметров диода

да, при которых происходит эффективная передача накопленной генератором энергии в диод [2]. Однако при оценке эффективности генерации и выпуска пучка ускоренных электронов в область применения (часто при атмосферном или повышенном давлении газовой среды) следует учитывать потери в выпускном окне ускорителя. В общем случае величина потерь в выпускном окне будет иметь обратную зависимость от кинетической энергии электронов и, соответственно, от амплитуды импульса ускоряющего напряжения. Также в ряде случаев для практического применения электронных пучков большое значение имеет скорость, с которой накопленная энергия выделяется, то есть развиваемая в диоде мощность. Полученные зависимости амплитуд мощности и ускоряющего напряжения от времени запаздывания тока в вакуумном электронном диоде анализируются в данной работе.

Определение диапазона параметров моделирования генератора импульсов ускоряющего напряжения, нагруженного на вакуумный электронный диод с нелинейным импедансом

Для проведения моделирования и последующего анализа результатов выбирался

диапазон параметров генератора импульсов ускоряющего напряжения и вакуумного электронного диода ускорителя, который может быть воспроизведён при практической проверке полученных результатов. При этом принимались во внимание следующие ограничения, описанные в [2]: максимальное значение импеданса диода $Z_{xx} = 2200 \text{ Ом}$ до момента нарастания тока через диод получено по результатам экспериментальных исследований свойств различных катодов для рассматриваемого диода; для обеспечения аperiodического режима формирования импульса ускоряющего напряжения минимальное значение импеданса диода в момент формирования сплошной плазменной эмиссионной поверхности не должно быть менее 200 Ом ; максимальное время запаздывания протекания тока 205 нс ограничивалось длительностью полупериода свободных колебаний разрядного контура генератора.

Для указанного диапазона параметров были получены формы кривых импульса напряжения и мощности (рис. 1, а), формируемых моделью генератора при работе на нагрузку, характер изменения импеданса которой имеет вид, представленный на рис. 1, б.

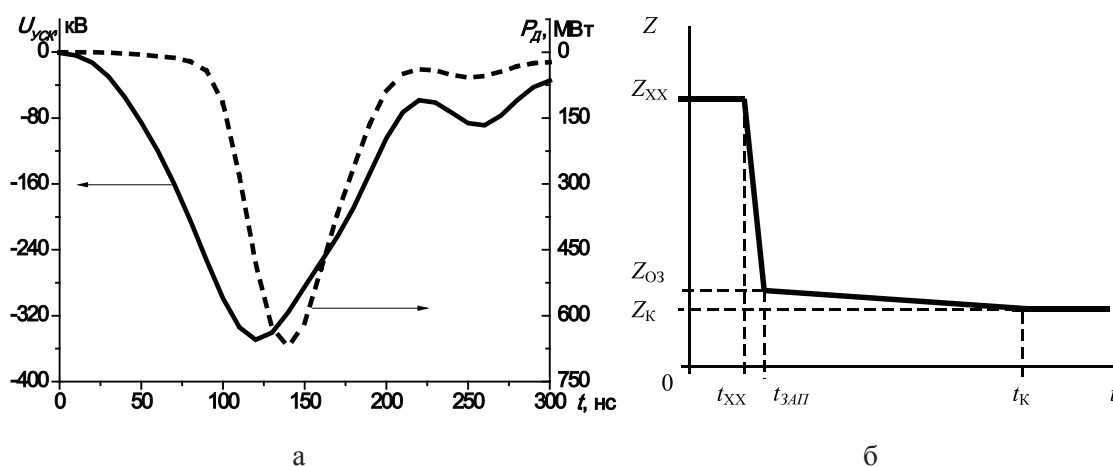


Рис. 1. Характерные моделируемые кривые импульсов ускоряющего напряжения и мощности, развиваемой в диоде (а). Характерная моделируемая кривая изменения импеданса диода и опорных моделируемых величин (б):

Z_{xx} – максимальный импеданс диода; $Z_{оз}$ – импеданс диода при ограничении тока объёмным зарядом; $Z_к$ – импеданс диода при окончании импульса ускоряющего напряжения;
 t_{xx} – длительность сохранения диодом максимального импеданса;
 $t_{зап}$ – время формирования сплошной плазменной эмиссионной поверхности катода;
 $t_к$ – длительность импульса ускоряющего напряжения

Для последующего анализа использовалась выборка из 500 смоделированных кривых импульсов ускоряющего напряжения и мощности, выбранные опорные точки которых были подтверждены эксперимен-

тальными результатами. Для представления результатов моделирования в графическом виде выделялись семейства кривых, объединённых по одному параметру. Для упрощения представления информации

всё семейство кривых представлялось несколькими характерными кривыми, две из которых соответствуют границам анализируемого диапазона параметра группировки.

Зависимость амплитуды генерируемого импульса напряжения от времени запаздывания тока в нагрузке

Построение кривых зависимости амплитуды импульса напряжения от времени за-

паздывания протекания тока в диоде (рис. 2, а) выявило характерное уменьшение зависимости амплитуды импульсов напряжения от импеданса нагрузки. Более подробный анализ кривых зависимостей (рис. 2, б) показал, что для величин запаздывания $t_{\text{зап}} > 125$ нс, изменение амплитуды импульса напряжения составляет менее 5%, а при $t_{\text{зап}} > 150$ нс сохраняется максимальным во всём диапазоне моделируемых параметров.

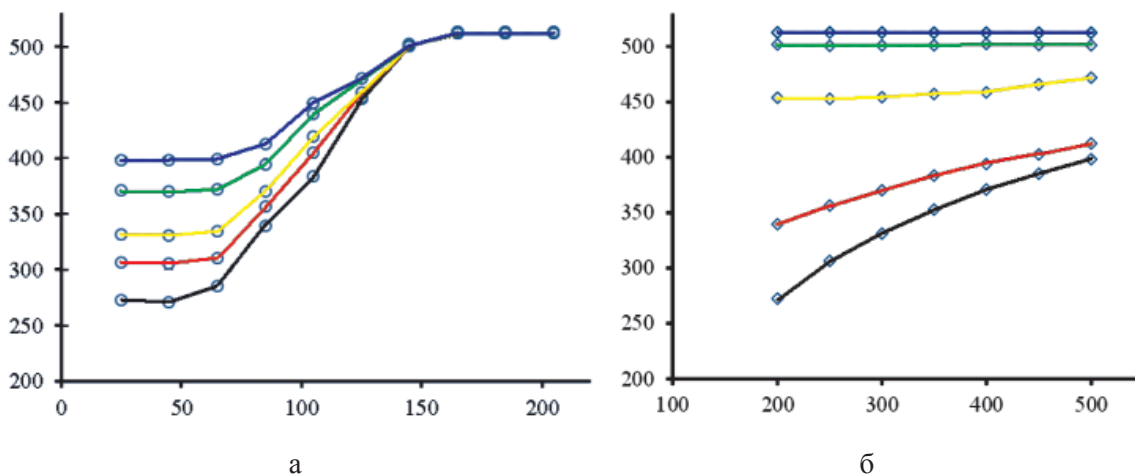


Рис. 2. Кривые зависимостей амплитуды импульса напряжения от времени запаздывания тока в диоде (а) и импеданса диода при ограничении тока объёмным зарядом (б). Символом «*» обозначены опорные точки, подтверждённые экспериментально. Слева от кривых цифрами указано значение Z_{03} [Ом] для (а) и $t_{\text{зап}}$ [нс] для (б)

Анализ характера кривых, представленных на рис. 2, позволяет также заключить, что в диапазоне моделируемых параметров, максимальные значения амплитуды импульсов напряжения превышают значения, достижимые только увеличением импеданса диода, и могут быть достигнуты только при увеличении значения запаздывания тока в диоде.

Зависимость амплитуды мощности, развиваемой в диоде, от времени запаздывания тока в нагрузке

Работа модели генератора без запаздывания тока в нагрузке подробно рассмотрена в [8]. Длительность импульса мощности при этом совпадает по длительности с импульсом напряжения, генерируемого на нагрузке. При возникновении запаздывания тока в нагрузке генератора длительность импульса мощности становится меньше длительности импульса ускоряющего напряжения (рис. 1). Максимальное значение амплитуды импульса мощности в данном исследовании соответствует времени запаздывания тока в диоде $t_{\text{зап}} = 125$ нс (рис. 3). Смещение от $t_{\text{зап}} = 125$ нс в сторону уменьшения или уве-

личения времени приводит к несимметричному уменьшению амплитуды развиваемой мощности. Данное явление может быть объяснено увеличением потерь энергии в активных элементах электрической схемы генератора при увеличении времени запаздывания протекания тока в диоде [8]. В то же время амплитуда импульса мощности имеет обратно пропорциональную зависимость от импеданса диода при ограничении тока объёмным зарядом (рис. 3, б), что объясняется увеличением постоянной времени разряда выходной цепи генератора.

Обсуждение результатов

Анализ кривых, приведённых на рис. 2 и 3, показал, что изменением времени запаздывания тока в диоде $t_{\text{зап}}$ и импеданса диода при ограничении тока объёмным зарядом Z_{03} можно в широких пределах регулировать значение амплитуды импульса ускоряющего напряжения и развиваемой в диоде мощности. Следует отметить, что максимальная кратность регулирования (по напряжению 1,9; по мощности 2,9) достигается изменением только $t_{\text{зап}}$ при $Z_{03} = 200$ Ом.

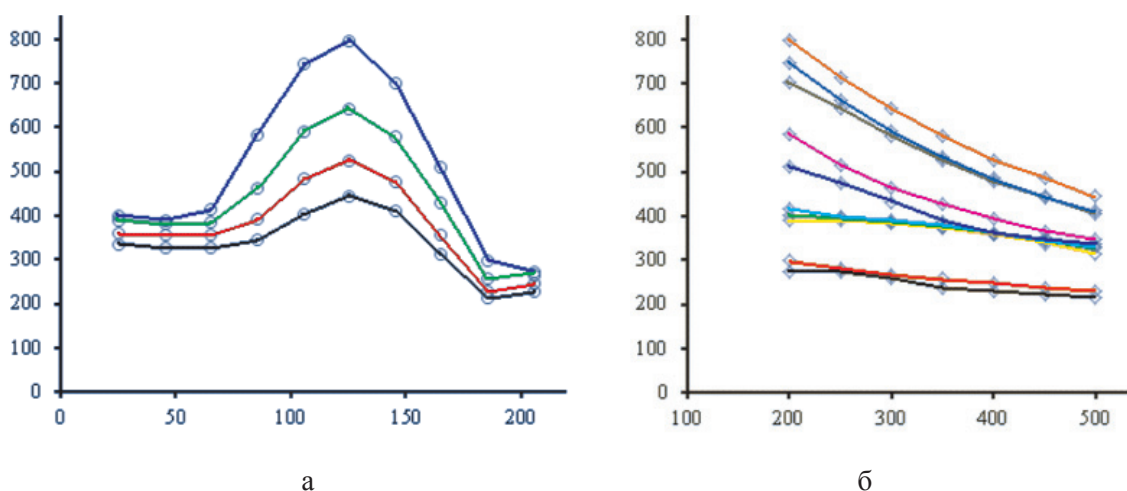


Рис. 3. Кривые зависимостей амплитуды импульса мощности, развиваемой в диоде, от времени запаздывания тока в диоде (а) и импеданса диода при ограничении тока объёмным зарядом (б). Символом «*» обозначены опорные точки, подтверждённые экспериментально. Слева от кривых цифрами указано значение Z_{O3} [Ом] для (а) и $t_{зап}$ [нс] для (б)

Из полученных зависимостей также следует, что при настройке вакуумного электронного диода ускорителя для выпуска импульсного электронного пучка в атмосферу требуется обеспечить запаздывание тока в диоде в пределах 125–150 нс. При этом достигаются амплитудные значения ускоряющего напряжения и мощности, близкие к максимальным. Немаловажно, что в указанном диапазоне $t_{зап}$ разброс значений U не превышает 5% для всего диапазона исследуемых значений Z_{O3} . Следует отметить, что выбранный диапазон Z_{O3} соответствует аperiodическому режиму разряда генератора высоковольтных импульсов ускорителя, что обеспечивает высокую эффективность передачи накопленной энергии в диод.

Для используемого ускорителя электронов АСТРА-М регулировка параметров вакуумного диода (Z_{O3} и $t_{зап}$) осуществлялась путём изменения величины катод-анодного зазора, введением дополнительного экранирующего электрода в прикатодную область и применением катодов с разными характеристиками плазмообразования.

Заключение

Для импульсного ускорителя электронов АСТРА-М получены и проанализированы зависимости амплитуд импульсов ускоряющего напряжения и развиваемой в диоде мощности от времени запаздывания тока в диоде и величины его импеданса. В результате анализа было установлено, что при обеспечении времени

запаздывания тока в диоде > 125 нс амплитуда импульсов ускоряющего напряжения практически не зависит (изменяется в пределах 5%) от импеданса диода в диапазоне 200–500 Ом. Максимальное значение развиваемой в диоде мощности при этом соответствует минимальному значению исследуемого импеданса вакуумного электронного диода 200 Ом. Полученные результаты используются при настройке диода импульсного ускорителя АСТРА-М для обеспечения оптимальных параметров генерации импульсного электронного пучка в вакууме и инжекции его в газовую среду.

Список литературы

1. Вагнер М.И., Егоров И.С., Кайканов М.И., Прибытков Г.А., Ремнев Г.Е., Савицкий А.П., Степанов А.В. Исследование характеристик планарного диода с композиционным катодом // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 11-3. – С. 80–85.
2. Егоров И.С. Оптимизация параметров электронного диода частотного сильноточного ускорителя // Современные проблемы науки и образования. – 2013 – № 6. – С. 870.
3. Егоров И.С., Ежов В.В., Полосков А.В. Исследование закономерностей изменения импеданса электронного диода с плоскими катодами // Фундаментальные исследования. – 2014 – № 9-9. – С. 1964–1968.
4. Егоров И.С., Кайканов М.И., Луконин Е.И., Ремнев Г.Е., Степанов А.В. Частотно-импульсный электронный ускоритель «Астра» // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 5. – С. 81–84.
5. Кайканов М.И., Ремнев Г.Е., Юдина Н.В., Егоров И.С., Лоскутова Ю.В. Исследование реологических свойств нефти при облучении импульсным сильноточным электронным пучком // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 6-2. – С. 37–41.
6. Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е. Исследование характеристик металлокерамического катода // Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73. – Вып. 4. – С. 124–128.

7. Ремнев Г.Е., Степанов А.В., Войно Д.А., Егоров И.С., Кайканов М.И., Маслов А.С., Меринова Л.Р., Попов А.В., Сярг Б.А., Шиян Л.Н. Очистка и стерилизация промышленно-бытовых сточных вод импульсным электронным пучком наносекундной длительности // Ядерная и радиационная физика 8-я Международная конференция: доклады. – Институт ядерной физики национального ядерного центра Республики Казахстан, 2011. – С. 506–509.

8. Egorov I. Note: Numerical simulation and experimental validation of accelerating voltage formation for a pulsed electron accelerator // Review of Scientific Instruments. – 2014. – Т. 85. – С. 066112.

9. Egorov I., Esipov V., Remnev G., Kaikanov M., Lukonin E., and Poloskov A. A high-repetition rate pulsed electron accelerator // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – Vol. 20. – № 4. – P. 1334–1339.

10. Egorov I.S., Kaikanov M.I., Kolokolov D.Yu. et al., Treatment of Industrial and Household Waste Water with the Pulse Electron Accelerator-Based Setup // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 10–3. – С. 61–64.

References

1. Vagner M.I., Egorov I.S., Kajkanov M.I., Pribytkov G.A., Remnev G.E., Savickij A.P., Stepanov A.V. *Izvestija vuzov. Fizika*, 2011, no. 54(11–3), pp. 80–85.

2. Egorov I.S. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 6, pp. 870.

3. Egorov I.S., Ezhov V.V., Poloskov A.V. *Fundamental research*, 2014, no. 9–9, pp. 1964–1968.

4. Egorov I.S., Kajkanov M.I., Lukonin E.I., Remnjov G.E., Stepanov A.V. *Instruments and experimental techniques*, 2013, Vol. 56, no. 5, pp. 568–570.

5. Kajkanov M.I., Remnev G.E., Judina N.V., Egorov I.S., Loskutova Ju.V. *Izvestija vuzov. Fizika*, 2012, no. 55(6–2), pp. 37–41.

6. Kotov Yu.A., Sokovnin S.Yu., Balezin M.E. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2003, Vol. 48., no. 4, pp. 503–507.

7. Remnev G.E., Stepanov A.V., Vojno D.A., Egorov I.S., Kajkanov M.I., Maslov A.S., Merinova L.R., Popov A.V., Sjarg B.A., Shijan L.N. *Trudy 8 mezhdunar. konf. «Yadernaya i radiatsionnaya fizika»* (Proc. 8th Int. Conf. «Nuclear and Radiation Physics»). Almaty, 2011, pp. 506–509.

8. Egorov I., *Review of Scientific Instruments*, 2014, Vol. 85. pp. 066112.

9. Egorov I., Esipov V., Remnev G., Kaikanov M., Lukonin E., and Poloskov A. A high-repetition rate pulsed electron accelerator, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, Vol. 20, no 4, pp. 1334–1339.

10. Egorov I.S., Kaikanov M.I., Kolokolov D.Yu. et al., *Izvestija vuzov. Fizika*, 2012, no. 55(10–3), pp. 61–64.

Рецензенты:

Ремнёв Г.Е., д.т.н., профессор, Институт физики высоких технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск;

Пушкарёв А.И., д.ф.-м.н., профессор, Институт физики высоких технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.

Работа поступила в редакцию 28.11.2014.