

УДК 537.312.36

С.В.Галямичев, (3 курс, каф. ИУС), В.И.Филимонов, к.т.н., доц.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА

Эволюция во времени среды из частиц с одинаковым зарядом представляет интерес для различных разделов физической электроники, в частности – электроники СВЧ. Принцип работы таких приборов, как лампа бегущей волны (ЛБВ), лампы обратной волны (ЛОВ), клистроны и т.д., основан на взаимодействии электронного потока с электромагнитными полями, причём модуляция скорости потока трансформируется в модуляцию плотности. Например, в ЛБВ в процессе этого взаимодействия происходит образование сгустков электронов и их торможение полем, в результате чего от электронного потока происходит отбор энергии. Теория подобных приборов, особенно в режиме большого сигнала, сложна. Поэтому для упрощения анализа в ряде случаев используется ряд допущений. В частности, пренебрегают кулоновскими силами, вызывающими расталкивание электронов и противодействующими процессу группировки.

Настоящая работа посвящена имитационному моделированию процесса временной деформации плотности $\rho(x,t)$ объемного заряда, обусловленной кулоновскими силами, в одномерном приближении. То есть, решается задача нахождения $\rho(x,t)$ по заданной начальной плотности

$$\rho(x,t)|_{t=0} = \begin{cases} \rho_H(x), & x \in [a, b] \\ 0, & x \notin [a, b] \end{cases}$$

и при заданных характеристиках носителей зарядов и среды.

Лишь в отдельных случаях возможно получение аналитического решения. Приближенный результат может быть получен путем численного решения соответствующей системы дифференциальных уравнений в частных производных. Альтернативой численным методам является метод частиц [1, 2], имеющий имитационный характер и применяемый в Эйлеровом, Лагранжевом или комбинированном варианте.

Нами рассматривались две имитационные модели, опирающиеся на эквивалентную систему точечных зарядов, использующие закон кулоновского взаимодействия, уравнения движения под действием кулоновских сил и реализованные в среде языка Turbo Pascal-7.

Первая модель основана на использовании равномерной сетки по x :

$$x_{i+1} = x_i + h_x,$$

причем, при $t=0$

$$q_i = \int_{x_i - 1/2}^{x_i + 1/2} \rho_H(x) dx, \quad i \in [0, n].$$

Во второй модели формируется система одинаковых зарядов в начальный момент из условия:

$$\int_{x_i - 1/2}^{x_i + 1/2} \rho_H(x) dx = q_i = \text{const}, \quad i \in [0, n],$$

причем, в общем случае начальное распределение зарядов неравномерно.

Функционирование первой модели сводится к пересчету величин зарядов в фиксированных точках пространства в моменты времени $t_{j+1} = t_j + h_t$. Функционирование второй модели сводится к нахождению траекторий точечных зарядов. В обоих случаях в

каждый момент времени осуществляется обратный переход от системы точечных зарядов к плотности $\rho(x_i, t_j)$.

Точность моделирования увеличивается с увеличением n и оценивалась методом, аналогичным эвристическому методу Рунге, то есть сравнением двух результатов, полученных при моделировании с различной степенью дискретизации. Вычислительные затраты примерно пропорциональны n^2 . Вычислительный эксперимент проводился с использованием первой и второй модели для различных конфигураций объемного заряда из электронов в вакууме, соответствующим тем, которые возникают при группировке электронов в ЛБВ.

Рассмотренный метод моделирования динамики объемного заряда может использоваться для двумерного и трехмерного случая. Однако, вычислительные затраты при этом будут существенно больше. Разработанные имитационные модели будут использоваться как часть имитационной модели процессов в ЛБВ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц.– М.: Мир, 1987 – 638 с.
2. Ю.М. Григорьев, В.А.Вшивков. Численные методы “частицы-в-ячейках”. – Новосибирск: Наука, 2000. – 184 с.