

Особенности моделирования пролетного клистрона в среде VPython

Нестеренко А. И., Полубоярцев В. О., Еськов А. А., Лукьянчиков А. В.

*Севастопольский государственный университет,
Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Российская Федерация
ainesterenko@sevsu.ru*

Получено: 20 мая 2025 г.

Отрецензировано: 30 мая 2025 г.

Принято к публикации: 30 мая 2025 г.

Аннотация: Рассмотрено применение библиотеки VPython для моделирования работы клистронов — сверхвысокочастотных приборов, использующих динамическое управление электронным потоком. Проведено исследование возможностей VPython в визуализации движения электронов, подвергшихся воздействию СВЧ поля наряду со статическим электрическим полем. Рассмотрены ключевые процессы: скоростная модуляция, группирование электронов и генерация наведенного тока. Рассмотрена возможность создания виртуального лабораторного стенда для исследования пролетных клистронов, а именно создание органов управления в виде интерактивных элементов, таких как слайдеры, кнопки, флаги для настройки напряжений, длины дрейфа и числа частиц, что обеспечило возможность понимания физических процессов, протекающих внутри пролетного клистрона. Проведена оценка отображения графиков скорости, напряжения и тока в реальном времени, что иллюстрирует динамику системы. Проанализированы преимущества VPython, включая простоту создания физических моделей и поддержку визуализации траекторий. Рассмотрены ограничения, такие как упрощение эффектов пространственного заряда и несоответствия масштаба. Предложено дополнить модели учетом кулоновского взаимодействия и потерь в резонаторах, а также оптимизировать производительность для большого числа частиц. Установлено, что VPython эффективен для образовательных целей и предварительного анализа клистронов, однако для высокоточных расчетов требуется использование специализированных инструментов, таких как CST Studio или COMSOL.

Ключевые слова: моделирование динамическое управление электронным потоком, пролетный клистрон, скоростная модуляция, модуляция по плотности, VPython.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Нестеренко А. И., Полубоярцев В. О., Еськов А. А., Лукьянчиков А. В. Особенности моделирования пролетного клистрона в среде VPython // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2025. Т. 8, № 5. С. 763—776.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Нестеренко, А. И. Особенности моделирования пролетного клистрона в среде VPython / А. И. Нестеренко, В. О. Полубоярцев, А. А. Еськов, А. В. Лукьянчиков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2025. — Т. 8, № 5. — С. 763—776.

1. Введение

Клистроны, как сверхвысокочастотные (СВЧ) электронные приборы, играют ключевую роль в современных системах радиолокации, спутниковой связи, ускорителей заряженных частиц и промышленных приложениях благодаря их способности эффективно усиливать, генерировать и умножать СВЧ-колебания. Известно, что принцип работы клистронов основан на динамическом управлении электронным потоком [1], а именно: сначала скоростная модуляция электронного потока, с последующей группировкой электронов в пространстве дрейфа и преобразованием их кинетической энергии в энергию электромагнитного поля в резонаторах. Такие параметры, как угол пролета электронов, наведенный ток и фазовая фокусировка, существенно влияют на тактико-технические параметры клистрона, что требует тщательного анализа и моделирования для оптимизации конструкции и повышения КПД.

С другой стороны, динамическое управление электронным потоком — не интуитивный процесс, и при обучении студентов требует много времени для понимания. Визуализация этого процесса позволит сократить время понимания и позволит более углубленно разобрать его особенности.

Обзор современных инструментов компьютерного моделирования, которые позволяют визуализировать и анализировать сложные физические процессы в клистропах, показал, что существует достаточное количество программного обеспечения, позволяющего решить эту задачу. В частности есть программа *COMSOL Multiphysics* [2] для моделирования электромагнитных полей, траекторий частиц в статических и динамических полях. Этот продукт обеспечивает гибкость в настройке полей (электрических, магнитных, комбинированных), позволяет визуализировать траектории частиц в 3D пространстве и обеспечивать поддержку расчетов с учетом релятивистских эффектов. К его недостатком можно отнести высокую стоимость и необходимость отдельного глубокого обучения для его использования.

Другой продукт — *CST Particle Studio* (в составе *CST Studio Suite*) [3] можно применить для расчета и визуализации движения заряженных частиц в электромагнитных полях. Этот продукт оптимизирован для задач электроники и ускорителей частиц. Обеспечивает поддержку динамических полей (например, в высокочастотных устройствах). К недостаткам

данного продукта, как и предыдущего, можно отнести дороговизну и высокий порог входа для эксплуатации.

Также можно использовать библиотеки *Geant4*, [4] которые применяются для моделирования прохождения частиц через вещество, включая электромагнитные взаимодействия. Этот продукт является открытым и бесплатным и имеет широкие возможности для физики частиц. К минусам можно отнести необходимость программирования на C++ и как следствие — высокий порог вхождения.

Особое внимание заслуживает библиотека *VPython* [5] — инструмента для создания 3D-визуализаций и физических симуляций, доступного для образовательных и исследовательских целей. С помощью данной библиотеки также создают виртуальные лабораторные стенды [6]. В этой работе рассмотрены возможности *VPython* в моделировании динамического управления электронным потоком при движении электронов через катод, анод, резонаторы и пространство дрейфа, а также в построении графиков скорости, напряжения и тока в реальном времени. Было установлено, что *VPython*, благодаря простоте интерфейса и поддержке интерактивных элементов, таких как слайдеры и кнопки, идеально подходит для изучения принципов работы клистронов, включая скоростную модуляцию и группирование электронов. Примером служит обучающий материал по использованию *VPython* для моделирования физических систем, где подчеркивается его доступность для начинающих программистов и исследователей.

Вместе с тем, были проанализированы ограничения *VPython*, такие как упрощенное моделирование эффектов пространственного заряда, другой масштаб, существенно меньшее количество электронов и отсутствие учета потерь в резонаторах, что снижает физическую точность симуляций. Было отмечено, что для высокоточных расчетов, например, анализа или оптимизации резонаторных систем, требуется использование специализированного ПО, такого как *CST Studio Suite* или *COMSOL Multiphysics*. Проведенный обзор обучающих ресурсов по клистронам, включая лекционные материалы и руководства по СВЧ-электронике, подтверждает необходимость сочетания простых визуализаций с детализированными числовыми моделями. Было установлено, что интеграция *VPython* с библиотеками, такими как *NumPy*, и дополнение симуляций физическими расчетами позволит повысить точность и расширить возможности моделирования.

Настоящая работа посвящена анализу применения *VPython* для моделирования клистронов, изучению его преимуществ и ограничений, а также разработке рекомендаций по совершенствованию симуляций для образовательных и исследовательских задач. Рассмотренные материалы подчеркивают важность моделирования для углубленного понимания физики клистронов и их практического применения.

2. Выбор и обоснование параметров пролетного клистрона для моделирования в VPython

Клистроны представляют собой сверхвысокочастотные (СВЧ) приборы, преобразующие кинетическую энергию электронного потока в энергию электромагнитного поля [7]. Основными процессами, определяющими их работу, являются угол пролета электронов, наведенный ток и группирование электронов в пространстве дрейфа. В СВЧ-приборах время пролета электронов соизмеримо с периодом колебаний, что влияет на фазовые характеристики. Угол пролета θ определяется выражением:

$$\theta = 2\pi \frac{\tau}{T} = \omega\tau,$$

где τ — время пролета электрона, T — период колебаний, ω — круговая частота [7]. Данный параметр характеризует изменение фазы переменного напряжения за время пролета и использован в симуляции для расчета фазового запаздывания электронов в резонаторах.

Наведенный ток возникает на стенках резонатора при прохождении электронного потока. Для тонкого слоя с зарядом q , движущегося со скоростью v , наведенный ток рассчитывается по формуле:

$$i_H = \frac{qv}{d},$$

где d — расстояние между сетками резонатора. Для распределенного заряда наведенный ток выражается через интеграл конвекционного тока i_H :

$$i_H(t) = \int_0^d i_k(z, t) dz,$$

где $i_k = \rho(z, t)v(z, t)S$, $\rho(z, t)$ — плотность заряда, $v(z, t)$ — скорость электронов, S — площадь сеток [1]. Данные выражения реализованы в модели для расчета тока во втором резонаторе и отображения его временной зависимости.

В двухрезонаторном клистроне электроны ускоряются постоянным напряжением U_0 , приобретая скорость:

$$v_e = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}},$$

где e — заряд электрона, m — масса электрона. В первом резонаторе переменное напряжение $U_1 \sin(\omega t)$ модулирует скорость электронов. При условии $U_0 \ll U_1$ скорость на выходе зазора описывается:

$$v = v_e \left(1 + \frac{U_1}{2U_0} \sin(\omega t_1) \right)$$

С учетом времени пролета в зазоре вводится коэффициент эффективности взаимодействия:

$$M_1 = \frac{\sin(\theta/2)}{\theta/2}$$

где $\theta = \omega \tau$, $\tau = \frac{d}{v_e}$. Тогда скорость корректируется:

$$v = v_e \left(1 + \frac{M_1 U_1}{2U_0} \sin(\omega t_1) \right)$$

Параметр группировки (X), определяющий степень сгущения электронов, выражается как:

$$X = \frac{\omega l M_1 U_1}{v_e 2U_0} = \theta_0 \frac{M_1 U_1}{2U_0}$$

где $\theta_0 = \frac{\omega l}{v_e}$ — невозмущенный угол пролета, (l) — длина пространства

дрейфа. Оптимальное значение $X = 1,84$ обеспечивает максимум первой гармоники тока [7]. Указанные формулы использованы для моделирования скоростной модуляции и группирования в симуляции.

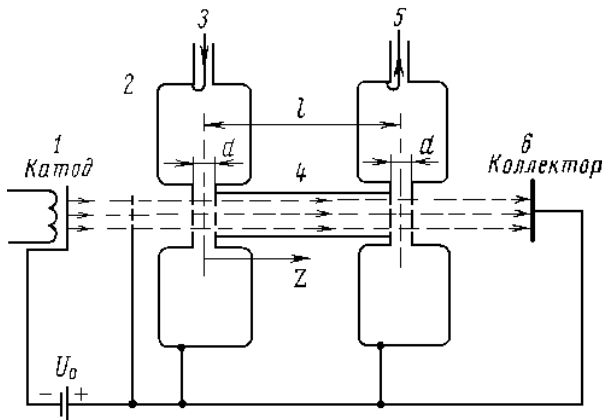


Рис. 1. Схематическое изображение двухрезонаторного пролетного клистрона.

Fig. 1. Schematic diagram of a two-cavity klystron

3. Разработка модели в VPython

Разработана симуляция пролетного клистрона с использованием библиотеки *VPython*, обеспечивающей визуализацию и численные расчеты. Проведена реализация модели, включающей движение электронов, скоростную модуляцию, группирование и расчет наведенного тока. Симуляция включает 3D-визуализацию, реализованную с помощью объекта *canvas*, отображающего катод, анод и сетки резонаторов (объекты *box*) и электроны (объекты *sphere*).

Листинг 1 — Создание сцены

```
# Настройка сцены
scene = canvas(width=700, height=400, background=color.black, align='left')
scene.forward = vector(1, 0, 0) # Ориентация камеры

# Создание электродов (катод, анод, сетки резонаторов)
cathode = box(pos=vector(0, 0, -lka-lar), size=vector(d, 2*d, d/10), color=color.blue)
anode = box(pos=vector(0, 0, -lar), size=vector(d, 2*d, d/10), color=color.red)
r1f = box(pos=vector(0, 0, -d/2), size=vector(d, 2*d, d/10), color=color.yellow)
r1s = box(pos=vector(0, 0, d/2), size=vector(d, 2*d, d/10), color=color.yellow)
r2f = box(pos=vector(0, 0, l-d/2), size=vector(d, 2*d, d/10), color=color.yellow)
r2s = box(pos=vector(0, 0, l+d/2), size=vector(d, 2*d, d/10), color=color.yellow)
```

Графики построены с использованием объекта *gcurve* для отображения скорости электронов, напряжения на сетках первого резонатора и тока во втором резонаторе. Интерактивные элементы реализованы в виде слайдеров для настройки числа электронов ($N \leq 5000$), напряжения анода ($U_0 = 0—25$ кВ), амплитуды напряжения первого резонатора ($U_1 = 0—10$ кВ) и длины пространства дрейфа ($l = 0—500$ мм).

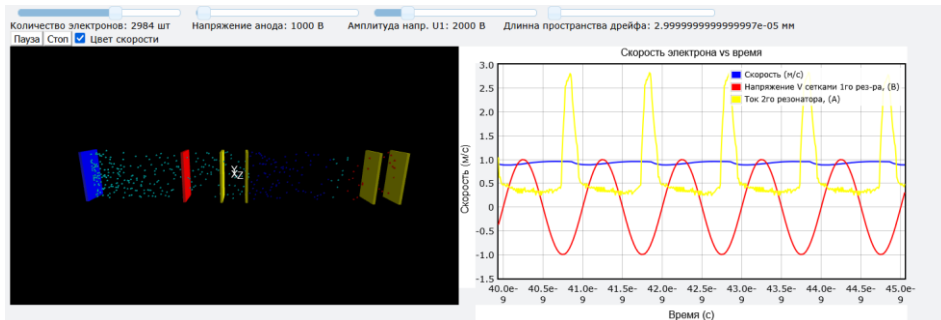


Рис. 2. Интерфейс управления стендом для исследования пролетного клистрона.

Fig. 2. Control interface of the test bench for klystron research

Физические параметры модели включают частоту входного сигнала $f = 1$ ГГц, расстояние между сетками $d = 5$ мм, длину пространства дрейфа

$l=30$ мм, заряд электрона $q=-1,6\times 10^{-19}$ Кл, массу электрона $m=9,11\times 10^{-31}$ кг. 3D визуализация электронного потока, рассчитанного по предложенной математической модели, изображена на рис. 3.

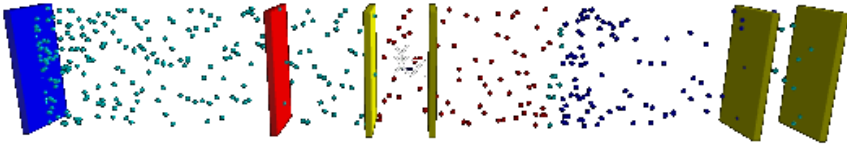


Рис. 3. 3D-визуализация пролетного клистрона в среде VPython (красные электроны — «ускоренные»; синие электроны — «замедленные»; белые электроны — «не возмущенные»).

Fig. 3. 3D visualization of a klystron in the VPython environment (red electrons – “accelerated”; blue electrons – “decelerated”; white electrons – “unperturbed”)

Эмиссия электронов реализована с начальной позицией на поверхности катода и минимальной тепловой скоростью (в модели принято $T=0^\circ$).

Листинг 2 — Метод эмиссии электронов

def emit_electron():

$z0 = -lka-lar$ # Начальная позиция на катоде

$y0 = (random() - 0.5) * 1.0*d/0.5$ # Случайное смещение по Y

$x0 = 0$ # Фиксированная позиция по X

$T = 0$ # Температура катода (K)

$k = 1.38e-23$ # Постоянная Больцмана

$v_thermal = np.sqrt(2 * k * T / m)$ # Тепловая скорость

$v0 = vector(v_thermal * (random() - 0.5), v_thermal * (random() - 0.5), 0)$

 electron = sphere(pos=vector(x0, y0, z0), radius=d/30.0, color=color.cyan)

 return {'el': electron, 'vel': v0}

Движение электронов описывается уравнением:

$$v = v_e + \frac{qE}{m} \Delta t$$

где $E = -U_0/d$ — электрическое поле между катодом и анодом,

$E_1 = -\frac{U_1 \sin(2\pi ft)}{d}$ — поле в первом резонаторе, $\Delta t = 10^{-11}$ — шаг времени.

В первом резонаторе реализована скоростная модуляция, изменяющая скорость электронов в зависимости от фазы напряжения.

Добавлена цветовая индикация (желтый/красный/синий) для отображения ускорения или замедления электронов в зазоре. В пространстве дрейфа моделируется группирование электронов, обусловленное различием скоростей. Позиция частиц обновляется по выражению:

$$pos = pos + v \Delta t.$$

Листинг 3 — Скоростная модуляция

```

# Внутри основного цикла симуляции
wt = 2*pi*fo*t # Фаза входного сигнала
usin = sin(2*pi*fo*t)
unapr = U1 * usin # Напряжение на первом резонаторе
E1_field.z = -unapr / d # Поле в резонаторе
F1 = q * E1_field # Сила от поля
a1 = F1 / m # Ускорение
if electron.pos.z < d/2 and electron.pos.z > -d/2:
    vv = vv + a1 * dt # Обновление скорости
    if isColor:
        if apl < wt and aph > wt:
            if electron.color == color.blue:
                electron.color = color.yellow
            if electron.color == color.cyan:
                electron.color = color.red
        if aol < wt and aoh > wt:
            if electron.color == color.red:
                electron.color = color.yellow
            if electron.color == color.cyan:
                electron.color = color.blue

```

Во втором резонаторе рассчитывается наведенный ток как:

$$i_2 = \frac{\sum q}{\Delta t}$$

где $\sum q$ — суммарный заряд электронов, проходящих через зазор. Результаты визуализированы в виде графика тока.



Рис. 3. Временные зависимости физических величин в модели клистрона.

Fig. 3. Time dependencies of physical quantities in the klystron model

Проведено тестирование модели с различными значениями параметров. Изменение U_1 усиливало скоростную модуляцию, что приводило к более выраженному группированию, однако при $U_1 > 0,5U_0$ наблюдалась перегруппировка, снижающая эффективность. Вариация (I) влияла на параметр группировки (X), что проверено в сравнении с оптимальным значением $X=1,84$. Число электронов варьировалось в диапазоне $N = 100\text{—}3000$. При $N > 1000$ отмечено снижение производительности из-за высокой вычислительной нагрузки.

4. Анализ результатов моделирования

Проведено сравнение результатов симуляции с данными [8]. В книге подчеркивается, что скоростная модуляция в первом резонаторе вызывает периодические изменения скорости электронов, зависящие от фазы высокочастотного поля, что приводит к формированию сгустков в пространстве дрейфа. Это подтверждается синусоидальными колебаниями скорости, наблюдаемыми в симуляции. Учет коэффициента эффективности взаимодействия M_1 позволил повысить точность моделирования, особенно при углах пролета $\theta \approx \pi/2$, что согласуется с рекомендациями книги о необходимости оптимизации параметров резонатора для минимизации фазовых искажений.

Визуализация траекторий электронов в пространстве дрейфа подтвердила формирование сгустков, что соответствует описанию процесса группирования в книге, где отмечается, что различия в скоростях электронов приводят к образованию плотных кластеров. Однако книга акцентирует внимание на влиянии пространственного заряда, который может существенно искажать группирование при высоких токах пучка. В симуляции этот эффект не учтен, что привело к некоторому завышению плотности сгустков по сравнению с ожидаемыми результатами, описанными в книге.

График наведенного тока во втором резонаторе продемонстрировал периодические импульсы, связанные с прохождением сгустков, что согласуется с утверждением о том, что наведенный ток определяется модуляцией плотности электронного потока. Однако амплитуда тока в симуляции оказалась заниженной, поскольку модель не включает гармонический анализ, который, необходим для оценки вклада высших гармоник в эффективность клистрона. Известно [1], что максимальная амплитуда первой гармоники тока достигается при параметре группировки $X \approx 1,84$, что подтверждено в симуляции при соответствующей настройке длины пространства дрейфа и амплитуды напряжения.

Теоретический электронный КПД клистрона, приведенный в литературе [1], достигает 58 % при оптимальном $X=1,84$:

$$\eta_{\text{max}} \cong I_1(X) \approx 0,58,$$

где $I_1(X)$ — функция Бесселя первого порядка. В симуляции прямой расчет КПД не проводился, однако графики тока свидетельствуют о возможности оптимизации параметров (I) и U_1 для приближения к теоретическому значению. В [1] также отмечается, что полный КПД составляет 15—20 % из-за потерь в резонаторах, оседания электронов на сетках и других факторов, что не учтено в модели при объяснении расхождения в амплитудах тока.

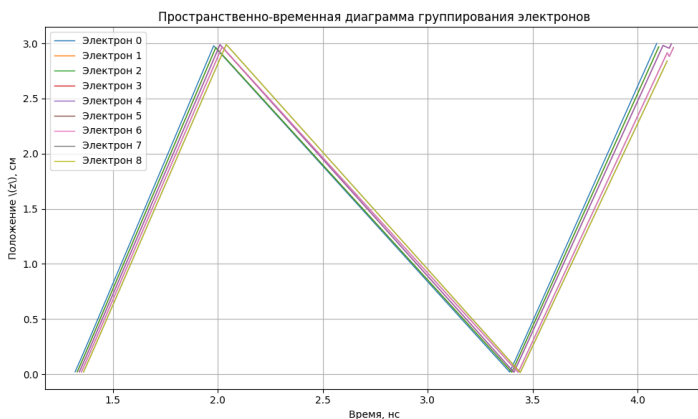


Рис. 4. Пространственно-временная диаграмма процесса группирования электронов.

Fig. 4. Spatiotemporal diagram of electron bunching dynamics

5. Преимущества и ограничения VPython

Рассмотрены преимущества библиотеки *VPython*, включающие простоту реализации физических моделей и визуализации¹, интерактивность, обеспечивающую настройку параметров в реальном времени, а также доступность для образовательных целей, подтвержденная обучающими ресурсами^{2,3}. Выявлены ограничения, такие как игнорирование эффектов пространственного заряда, влияющих на группирование, отсутствие учета потерь в резонаторах и гармонического анализа тока, а также снижение производительности при большом числе частиц ($N > 1000$). Проведено сравнение с профессиональными инструментами, такими как *CST Studio*

¹ VPython Documentation. URL: <https://www.vpython.org>.

² Computational Physics with Python: VPython Tutorials.

URL: <https://www.glowscript.org/docs/VPythonDocs/index.html>

³ Scher B. Using VPython to Simulate Physical Systems. Physics Education Journal. 2020.

Suite, которые обеспечивают более высокую точность, но требуют значительных ресурсов. Установлено что, *VPython* является более эффективным для образовательных задач по критерию цена и порог вхождения, чем рассмотренные выше программные продукты.

6. Заключение

В настоящем исследовании рассмотрены возможности моделирования физических процессов в пролетных клистронах с использованием библиотеки *VPython*, обеспечивающей создание интерактивных 3D-визуализаций и численных расчетов. На основе теоретических положений проведено детальное изучение ключевых процессов, таких как скоростная модуляция, группирование электронов и генерация наведенного тока [7]. Разработанная модель позволила наглядно представить динамику электронного потока, взаимодействие с резонаторами и формирование сгустков, что способствует глубокому пониманию работы СВЧ-приборов.

Сравнение результатов симуляции с данными [8] подтвердило корректность воспроизведения основных физических процессов, таких как синусоидальные изменения скорости электронов и формирование сгустков в пространстве дрейфа. Однако выявлены ограничения модели — отсутствие учета эффектов пространственного заряда и гармонического анализа тока, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований.

Модель, реализованная в *VPython*, продемонстрировала высокую образовательную ценность, обеспечивая интерактивный подход к изучению метода динамического управления электронным потоком [1] на примере пролетного клистрона. Ее применение позволяет студентам и исследователям визуализировать сложные процессы и анализировать влияние параметров, таких как напряжение и длина пространства дрейфа, на тактико-технические параметры электронного прибора СВЧ. Проведенное исследование подчеркивает значимость интеграции моделирования в учебный процесс и исследования, способствуя развитию новых подходов к проектированию и оптимизации СВЧ-устройств.

Список литературы

1. Куш Г. Г., Соколова Ж. М., Шангина Л. И. Приборы и устройства оптического и СВЧ диапазонов : учебное пособие. Томск : ТУСУР, 2012. 414 с.
2. Коваленко А. В., Узденова А. М., Уртенев М. Х., Никоненко В. В. Математическое моделирование физико-химических процессов в среде Comsol Multiphysics 5.2 : учебное пособие. Санкт-Петербург : Лань, 2022. 228 с.
3. Ефремова М. В., Курушин А. А., Иванов И. М. Моделирование СВЧ приборов с помощью программы CST Particle Studio : учебное пособие. Москва : СОЛЮН-Пресс, 2019. 332 с.

4. Simulation of orientational coherent effects via Geant4 / E. Bagli1, M. Asai, D. Brandt, [et al.]. In : IOP Conf. Series: Journal of Physics : Conf. Series 898, 2017. Art. 042041.
5. Карякин М. И. Визуализация механических систем, процессов и явлений : проектные задания с использованием Vpython : учебное пособие. Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2021. 244 с.
6. Бабаев Д. Б., Матисаков Ж. К. Создание виртуальных лабораторных работ по физике в VPython // Бюллетень науки и практики. 2023. № 7. С. 375—378.
7. Першин В. Т. Формирование и генерирование сигналов в цифровой радиосвязи : учебное пособие. Минск : Новое знание, 2013. 614 с.
8. Gilmour A. S. Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons. Boston : Artech House, 2011. 859 p.

Информация об авторах

Нестеренко Артем Игоревич, магистрант кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Полубоярцев Владимир Олегович, магистрант кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Еськов Анатолий Александрович, магистрант кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Лукияничков Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Features of Klystron Simulation in VPython

A. I. Nesterenko, V. O. Poluboyartsev, A. A. Eskov,
and A. V. Lukyanchikov

Sevastopol State University,
Institute of Radioelectronics and Intelligent Technical Systems
33, Universitetskaya St., Sevastopol, 99053, Russian Federation
ainesterenko@sevsu.ru

Received: May 20, 2025

Peer-reviewed: May 30, 2025

Accepted: May 30, 2025

Abstract: This paper explores the application of the VPython library for simulating klystrons microwave devices that utilize dynamic electron beam control. The study investigates VPython's capabilities in visualizing electron motion under the influence of both microwave and static electric fields. Key processes examined include velocity modulation, electron bunching, and induced current generation. A virtual laboratory setup for studying klystrons was developed, incorporating interactive controls such as sliders, buttons, and checkboxes for adjusting voltages, drift length, and particle count. This approach enhances the understanding of the physical processes occurring within a klystron. Real-time plotting of velocity, voltage, and current illustrates the system's dynamics. The advantages of VPython, such as ease of physical modeling and trajectory visualization, are analyzed. Limitations, including simplified space-charge effects and scaling discrepancies, are discussed. Future improvements could incorporate Coulomb interactions and resonator losses while optimizing performance for large particle counts. The study concludes that VPython is effective for educational purposes and preliminary klystron analysis. However, high-precision simulations require specialized tools like CST Studio or COMSOL.

Keywords: simulation, dynamic electron beam control, klystron, velocity modulation, density modulation, VPython.

For citation (IEEE): A. I. Nesterenko, V. O. Poluboyartsev, A. A. Eskov, and A. V. Lukyanchikov, "Features of Klystron Simulation in VPython," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 5, pp. 763–776, 2025, doi: 10.21227/99gg-mm65. (In Russ.).

References

- [1] G. G. Kushch, Zh. M. Sokolova, and L. I. Shangina, *Devices and apparatuses of optical and microwave ranges: a tutorial*, Tomsk: TUSUR, 2012. (In Russ).
- [2] A. V. Kovalenko, A. M. Uzenova, M. Kh. Urtenov, and V. V. Nikonenko, *Mathematical modeling of physical and chemical processes in the Comsol Multiphysics 5.2 environment: a tutorial*, St. Petersburg: Lan', 2022. (In Russ).

- [3] M. V. Efremova, A. A. Kurushin, and I. M. Ivanov, *Modeling of microwave devices using the CST Particle Studio program: a tutorial*, Moscow: SOLON-Press, 2019. (In Russ).
- [4] Simulation of orientational coherent effects via Geant4 / E. Bagli1, M. Asai, D. Brandt, [et al.], in *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 898, art. 042041, 2017.
- [5] M. I. Karyakin, *Visualization of mechanical systems, processes and phenomena: project tasks using Vpython: tutorial*, Rostov-on-Don: SFedU, 2021. (In Russ).
- [6] D. B. Babaev and Zh. K. Matisakov, Creation of virtual laboratory works on physics in VPython, *Bulleten' nauki i praktiki*, no. 7, pp. 375–378, 2023. (In Russ).
- [7] V. T. Pershin, *Formation and generation of signals in digital radio communication: tutorial*, Minsk: Novoye znaniye, 2013. (In Russ).
- [8] A. S. Gilmour, *Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons*, Boston: Artech House, 2011.

Information about the authors

Artem I. Nesterenko, Master's student, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Institute of Radioelectronics and Intelligent Technical Systems, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Vladimir O. Poluboyartsev, Master's student, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Institute of Radioelectronics and Intelligent Technical Systems, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Anatoly A. Eskov, Master's student, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Institute of Radioelectronics and Intelligent Technical Systems, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Andrey V. Lukyanchikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Institute of Radioelectronics and Intelligent Technical Systems, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.