

УДК 621.396.61

И.В. Сивчек, В.А. Сороцкий

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МОЩНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ТЕТРОДА

I.V. Sivchek, V.A. Sorotsky

SIMULATION MODEL OF POWER TETRODE

Рассмотрен новый подход к построению модели мощного генераторного тетрода, предназначенной для применения в SPICE-подобных симуляторах. Используемая в модели аппроксимация характеристик тетрода позволила учесть физические эффекты, связанные со взаимным влиянием напряжений на аноде, экранированной и управляющей сетках на токи, протекающие через эти выводы, что привело к более чем двукратному снижению погрешности вычисления основных характеристик тетрода по сравнению с известными аналогами.

МОЩНЫЙ ГЕНЕРАТОРНЫЙ ТЕТРОД; АППРОКСИМАЦИЯ; SPICE; РАДИОПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО.

The paper covers a new approach to the development of a power tetrode simulation model applicable in SPICE-similar simulators. Used approximation of tetrode characteristics reveals physical effects of the plate, screen grid and control grid voltages influence on the electrodes' currents. It resulted in error decline compared with the known models as much as more than two times.

POWER TETRODE; APPROXIMATION; SPICE; TRANSMITTER.

Несмотря на успехи, достигнутые за последние десятилетия в совершенствовании характеристик полупроводниковых приборов, электронно-вакуумные лампы (ЭВЛ) по-прежнему находят широкое применение как в нашей стране, так и за рубежом при создании мощных (до 1000 кВт) и сверхмощных (свыше 1000 кВт) радиопередающих устройств (РПДУ). Опубликованные недавно в [1] результаты теоретических и экспериментальных исследований, в которых показана возможность заметного улучшения энергетических характеристик РПДУ, выполненных на ЭВЛ, могут еще больше повысить интерес специалистов к использованию данных приборов. Действительно, за счет реализации в конечном каскаде на мощном генераторном тетроде ключевого режима класса E с уменьшенными коммутационными потерями мощности, который

до этого применялся только в транзисторных схемах, промышленный КПД РПДУ может возрасти до значений 75–78 %, а электронный КПД при этом составит 88–92 %. По этим показателям РПДУ на ЭВЛ, уже начиная с частот в десятки килогерц, вполне могут конкурировать с аналогичными характеристиками радиопередатчиков, реализуемых на полупроводниковой элементной базе, заметно опережая их по уровню выходной мощности.

При проектировании РПДУ на мощных генераторных лампах разработчики обычно сталкиваются с рядом проблем, обусловленных высокой трудоемкостью традиционно применяемых в подобной практике аналитических методов расчета и их сравнительно большой погрешностью, превышающей иногда значения 15–20 %. Указанную проблему можно преодолеть с

помощью имитационного компьютерного моделирования, которое, учитывая достаточно высокий уровень выходной мощности, позволит сократить затраты времени и средств на стадии экспериментального макетирования устройства. Однако этому мешает отсутствие качественных компьютерных моделей генераторных ЭВЛ. С учетом изложенного, цель настоящей работы – создание модели мощного генераторного тетрода, обеспечивающей повышение точности расчетов оконечных каскадов радиопередающих устройств и предназначенной для использования в универсальных средах схемотехнического моделирования.

Сравнительный анализ существующих подходов к построению компьютерных моделей ЭВЛ. Существует несколько моделей ЭВЛ различных типов (триод, тетрод, пентод), созданных применительно к задачам разработки аудиоаппаратуры и по этой причине в основном подходящих для описания маломощных ламп. Попытка их использования для описания электрических характеристик мощных генераторных тетродов выявила существенные недостатки.

В модели Дункана Монро [2], входящей в состав стандартных библиотек *Micro-Cap*, аппроксимация тока управляющей сетки не учитывает зависимость от напряжения на экранной сетке. Кроме того, аппроксимация тока анода не учитывает уменьшение крутизны проходной характеристики при большом уровне сигнала на управляющей сетке.

В модели Нормана Корена [3], используемой в *PSpice*-библиотеке ЭВЛ, функция, лежащая в основе аппроксимации характеристик анодного тока, не учитывает влияние напряжения на аноде при малых токах, а в функции, описывающей ток экранной сетки, не отражена зависимость от напряжения на аноде. Ток управляющей сетки аппроксимируется с помощью диодной характеристики, что не позволяет учесть зависимость от напряжения на аноде и на экранной сетке.

В модели Чарльза Райдела [4], применяемой в библиотеках компонентов среды схемотехнического моделирования *ICAP/4* (*SPICE*-подобный симулятор), функция,

аппроксимирующая ток управляющей сетки, не позволяет отразить зависимость от напряжения на экранной сетке и напряжения на аноде. В основе аппроксимации тока анода лежит известный закон «3/2», который не учитывает уменьшение крутизны проходной характеристики в области больших напряжений на управляющей сетке.

Технологии построения модели мощного генераторного тетрода. Существующие подходы, применяемые при создании моделей электронных приборов, можно разбить на две категории.

1. Нахождение функций, описывающих электрические характеристики прибора, исходя из физических законов, лежащих в основе его работы. Данный способ применяется в первую очередь компаниями-разработчиками приборов, т. к. требует знания конструктивно-технологических параметров, как правило, недоступных для потребителей.

2. Определение приближающих функций, описывающих электрические характеристики прибора, на основе экспериментальных данных с использованием формализованных параметров, которые не всегда могут быть интерпретированы физически. Несмотря на отмеченный недостаток, данный метод получил широкое распространение на практике. В частности, поскольку он хорошо подходит для реализации в *SPICE*-симуляторах и им подобных продуктах, все три описанные выше модели тетродов созданы именно таким образом. В числе других общих особенностей реализации второго метода следует также отметить возможность представления искомой аппроксимирующей функции с помощью известного набора элементарных функций, хотя в ряде случаев это может быть сопряжено с более высокой трудоемкостью решения данной задачи.

Модель мощного генераторного тетрода. Исходя из рассмотренных выше достоинств второго метода, при решении задачи воспроизведения характеристик генераторных ЭВЛ представлялось целесообразным взять за основу именно его, обратив особое внимание на то, чтобы в разрабатываемой мо-

дели нашли свое адекватное отражение те важные для мощных приборов физические эффекты, которые не учтены в известных моделях.

Основную сложность при создании модели представляет описание статических характеристик тетрода. Поведение динамических характеристик определяется межэлектродными емкостями, учет которых не представляет трудностей. Таким образом, задачу можно свести к нахождению трех аппроксимирующих функций (токи электродов) от трех переменных (напряжения на электродах).

Ток анода. В отличие от рассмотренных выше моделей [2–4] зависимость тока анода от напряжения на управляющей сетке целесообразно выразить с помощью функции на основе гиперболического тангенса. Данный прием известен давно и, как показано в ряде научно-технических публикаций, позволяет уменьшить погрешность воспроизведения вольт-амперных характеристик (ВАХ) ЭВЛ в области больших токов анода. Зависимость тока от напряжений на других электродах можно учесть с помощью введения линейных коэффициентов по аналогии с законом «3/2» для тетродов, в котором такие коэффициенты характеризуют межэлектродную проницаемость. Аппроксимирующая функция имеет вид:

$$I_p = (A + B \cdot th(C(U_g + D(U_p, U_s))))F(U_p, U_s), \quad (1)$$

$$D(U_p, U_s) = p_{00} + p_{10} \cdot U_p + p_{01} \cdot U_s, \quad (2)$$

$$F(U_p, U_s) = q_{00} + q_{10} \cdot U_p + q_{01} \cdot U_s, \quad (3)$$

где I_p – ток анода; U_p – напряжение на аноде; U_s – напряжение на экранной сетке; U_g – напряжение на управляющей сетке; $A, B, C, p_{01}, p_{00}, p_{10}, q_{00}, q_{10}, q_{01}$ – коэффициенты. Функция $F(U_p, U_s)$ служит для увеличения точности аппроксимации.

Ток экранной сетки. Для описания поведения зависимости тока экранной сетки от напряжений на электродах (управляющей сетке, аноде и экранной сетке) целесообразно воспользоваться следующей функцией:

$$I_s = G(U_g + r_{00} + r_{10} \cdot \sqrt{U_p} + r_{01} \cdot U_s)^3, \quad (4)$$

где I_s – ток экранной сетки; U_p – напряжение на аноде; U_s – напряжение на экранной сетке; U_g – напряжение на управляющей сетке; $G, r_{01}, r_{00}, r_{10}$ – коэффициенты.

Следует заметить, что на характер зависимости влияет технология, по которой создана лампа, поэтому может потребоваться корректировка данного выражения с учетом технологических особенностей конкретных типов ЭВЛ.

Ток управляющей сетки. Для повышения точности аппроксимации данного тока в сравнении с указанными выше моделями необходимо учесть его зависимость от напряжений на аноде и экранной сетке. С учетом этого целесообразно использовать функцию:

$$I_g = (s_{00} + s_{10} \cdot U_p + s_{01} \cdot U_s)U_g^{1.5}, \quad (5)$$

где I_g – ток управляющей сетки; U_p – напряжение на аноде; U_s – напряжение на экранной сетке; U_g – напряжение на управляющей сетке; s_{01}, s_{00}, s_{10} – коэффициенты.

Нахождение коэффициентов аппроксимирующих функций. Неизвестные коэффициенты в (1)–(5) могут быть определены путем решения оптимизационной задачи с использованием одного из алгоритмов поиска глобального экстремума, реализованного для применения в программных продуктах типа MATLAB, Mathcad и т. п. В качестве целевой функции целесообразно использовать, например, среднеквадратическое отклонение в экспериментальных точках.

Критерии оценки качества имитационной модели. Наибольший интерес при исследовании оконечных каскадов РПДУ, выполненных на мощных ЭВЛ, обычно представляют энергетические характеристики, которые должны быть определены с заданной точностью. Требования к допустимой погрешности вычисления этих характеристик обычно нетрудно преобразовать в аналогичный показатель, отражающий погрешность аппроксимации статических ВАХ приборов. При этом очевидно, что различные участки ВАХ могут иметь неодинаковую точность аппроксимации, причем

отличие может оказаться довольно существенным. В данном случае следует учесть, насколько важным является вклад того или иного участка в характеристики исследуемого режима работы РПДУ. Если не удается аппроксимировать ВАХ на всех участках с точностью не хуже заданной, то следует попробовать обеспечить необходимую точность на участках, наиболее важных для моделирования исследуемого режима работы усилителя мощности. Это подчеркивает необходимость осознанного выбора целевой функции, используемой при нахождении коэффициентов аппроксимирующих зависимостей. Так, например, минимизация среднеквадратического отклонения приведет к тому, что наибольшая относительная точность аппроксимации будет получена для больших значений токов, что может не отвечать требованиям конкретной задачи.

В качестве примера рассмотрим аппроксимацию тока анода лампы ГУ-94. Если интерполировать экспериментальные данные, то для каждой ветви характеристик $I_p(U_g)$ можно построить график зависимости относительной ошибки аппроксимации от величины тока при различных напряжениях на аноде и экранной сетке. Относительная ошибка аппроксимации ветви ВАХ вычисляется по формуле:

$$(I_{p_app}(U_g) - I_{p_s}(U_g)) \cdot 100 / I_{p_s}(U_g)$$

при $U_p, U_s = \text{const}$,

где $I_{p_app}(U_g)$ – аппроксимирующая функция; $I_{p_s}(U_g)$ – сплайн-интерполяция экспериментальных данных.

На рисунке показаны графики, полученные усреднением этих зависимостей при двух различных критериях нахождения коэффициентов. Как легко заметить, модель мощного генераторного тетрода, разработанная на основе рассмотренного в настоящей статье метода аппроксимации (кривые 1 и 2), дает в среднем существенно меньшую ошибку, чем, например, модель Корена (кривая 3). Для кривой 1 максимальная нормированная среднеквадратическая ошибка аппроксимации тока анода на одной ветви ВАХ не превышает 2%. При этом погрешность аппроксимации тока

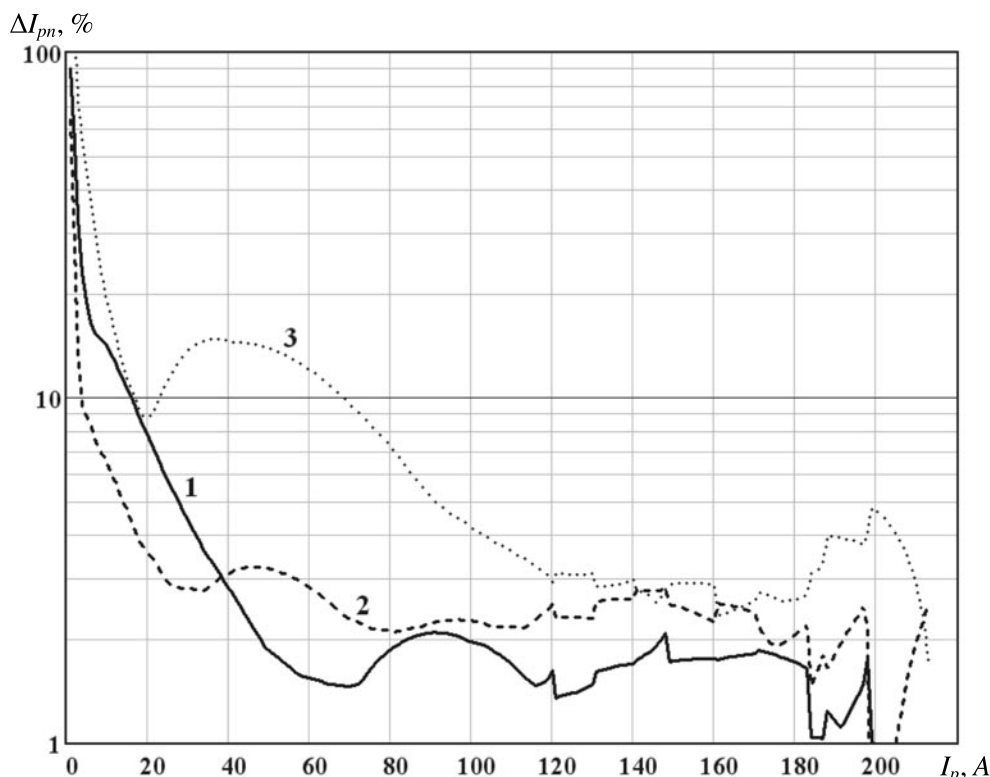
управляющей сетки не превышает 3%, а тока экранной сетки – 5%.

Как и следовало ожидать, использование метода наименьших квадратов в качестве критерия нахождения коэффициентов аппроксимирующей функции привело к тому, что наилучшая относительная точность получается для больших токов, а для малых ошибка составляет десятки процентов.

Кривая 2 относится к случаю, когда коэффициенты аппроксимирующей функции найдены исходя из критерия минимизации суммы модулей ошибок с использованием весовых коэффициентов. Весовые коэффициенты равны десяти для токов, не превышающих 40 А, и единице для всех остальных. Видно, что распределение ошибки в зависимости от величины тока стало более равномерным. Например, при токе 20 А относительная ошибка уменьшилась примерно в два раза. Однако при этом возросла ошибка аппроксимации больших токов.

Рассмотренный пример показывает, что выбор критерия нахождения параметров аппроксимирующих функций может оказать большое влияние на ошибку аппроксимации и, как следствие этого, – на ошибки моделирования усилителя мощности РПДУ. Это актуально и при аппроксимации остальных токов ЭВЛ.

Рассмотренный в настоящей статье подход позволил реализовать имитационную модель мощного генераторного тетрода, превосходящую известные аналоги как по качественным, так и по количественным показателям. В плане качественных достоинств предложенной модели следует подчеркнуть то, что она более полно учитывает физические эффекты, связанные со взаимным влиянием напряжений на аноде, экранной и управляющей сетках, на токи, протекающие через эти выводы. В свою очередь, улучшение количественных характеристик модели, оцениваемое по снижению погрешности, достигается за счет более точного подбора приближающих функций, описывающих электрические характеристики прибора. Это позволило, в частности, уменьшить среднеквадратиче-



Относительная ошибка аппроксимации тока анода ΔI_{pn} в зависимости от величины тока I_p . Критерий нахождения параметров аппроксимирующей функции: 1 – минимизация суммы квадратов ошибок; 2 – минимизация суммы модулей ошибок с весовыми коэффициентами; 3 – минимизация суммы квадратов ошибок для модели Корена

скую ошибку аппроксимации тока анода в 2,5 раза по сравнению с моделью Корена, которую можно считать наиболее точной из известных аналогов.

Благодаря тому, что модель изначально создавалась с расчетом на использование в SPICE-подобных симуляторах, она хорошо

подходит для реализации в универсальных программных средах схемотехнического моделирования. Это позволит существенно снизить трудоемкость исследования процессов в оконечных каскадах мощных радиопередающих устройств при одновременном повышении точности расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сырников Э.В. Построение ключевых радиопередающих устройств большой мощности. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.
2. Duncans's Amp Pages [электронный ресурс] / URL: <http://www.duncanamps.com/> (дата обращения 16.08.2013).

3. Koren Norman L. Improved Vacuum-Tube Models for SPICE simulations // Glass Audio. –1996. – Vol. 8. – № 5. –18 p.
4. Rydel Ch. Simulation of Electron Tubes with Spice // Proc. of the 98th Audio Engineering Society Convention, Febr. 25-28, 1995, Paris.

REFERENCES

1. Syrnikov E.V. Postroyeniye klyuchevykh radioperedayushchikh ustroystv bol'shoy moshchnosti. – St.-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. (rus)
2. Duncans's Amp Pages. Available <http://www.duncanamps.com/> (Accessed 16.08.2013).

3. Koren Norman L. Improved Vacuum-Tube Models for SPICE simulations / Glass Audio. – 1996. – Vol. 8. –№ 5. –18 p.
4. Rydel Ch. Simulation of Electron Tubes with Spice / Proc. of the 98th Audio Engineering Society Convention, Febr. 25-28, 1995, Paris.

СИВЧЕК Игорь Владимирович – аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: cotgreat@gmail.com

SIVCHEK, Igor V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: cotgreat@gmail.com

СОРОЦКИЙ Владимир Александрович – заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: sorotsky@mail.spbstu.ru

SOROTSKY, Vladimir A. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: sorotsky@mail.spbstu.ru