

ПОТЕНЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕКТЕН

Алексєєв В.О.

e-mail: vasyli.aliexsieiev@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф.КРiCTЗi

м. Харків, Україна

An assessment of the potential characteristics of rectennas with a half-wave rectification circuit has been conducted. The key factors affecting the efficiency of rectennas have been identified, including the type of rectifying elements, frequency characteristics, parasitic losses, and temperature fluctuations. Practical recommendations are provided for selecting rectifying elements and optimizing rectification circuits to achieve maximum energy conversion efficiency under conditions of limited power consumption.

Потенційні характеристики ректен визначають реальні межі параметрів та показників, яких можна досягти під час перетворення електромагнітної (ЕМ) енергії в енергію постійного струму за реальних умов експлуатації. Вони враховують фізичні обмеження, такі як паразитні втрати, температуру, дефекти компонентів, а також конструктивні особливості і умови експлуатації. Оцінка потенційних характеристик ректен є важливою для їх застосування в системах безпроводного енергозабезпечення [1]. Підходи до проектування ректен поділяють на дві основні категорії. Перша категорія стосується розроблення конструкцій випромінювачів ректен, які забезпечують максимальне поглинання енергії з навколишнього простору [2]. Друга категорія охоплює вдосконалення схем випрямлення. ККД випрямлення ректени визначається чотирма ключовими факторами: рівнем вхідної потужності, топологією випрямляча, робочою частотою та параметрами випрямного елемента [2].

Випромінювач (рис. 1) приймає падаюче на нього високочастотне ЕМ- випромінювання й спрямовує його енергію до випрямляча. Вхідний фільтр Ф1 запобігає втратам потужності через перевипромінювання, пригнічуючи вищі гармоніки, що виникають у процесі випрямлення.

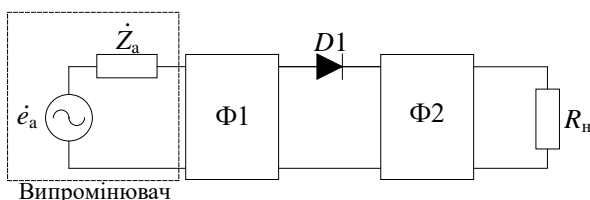


Рисунок 1 – Схема ректени

Діод $D1$ випрямляє високочастотний струм, що надходить на його вхід. Вихідний фільтр $\Phi 2$ згладжує випрямлений сигнал, зменшуючи амплітуди залишкових високочастотних компонент, і забезпечує узгодження між випрямлячем і навантаженням. Потужність постійного струму в навантаженні ректени (рис. 1) відрізняється від вхідної потужності $P_{вх}$ на величину втрат, які складаються з кількох основних складових: потужності втрат у випрямному діоді ($D1$), втрат у елементах вхідного ($\Phi 1$) і вихідного ($\Phi 2$)

фільтрів, втрат через випромінювання ректени на частотах вищих гармонік, а також втрат через проникнення гармонік у навантаження R_n . Додатково частина енергії може перевипромінюватися ректеною на основній частоті. Зниження цих втрат є ключовим завданням для підвищення ККД ректени. Однак, попри численні дослідження, у літературі відсутні чіткі практичні рекомендації щодо вибору випрямних елементів для ректен, які перетворюють ЕМ-енергію з навколишнього середовища в постійний струм. Щоб оцінити вплив втрат потужності у діоді на ККД ректени, слід, за можливості, виключити з розгляду інші фактори втрат. Це можна зробити, припустивши, що вхідний (Ф1) і вихідний (Ф2) фільтри (рис. 1) мають характеристики ідеальних фільтрів, тобто втрати в елементах фільтрів відсутні

Виділимо три групи параметрів діодів з бар'єром Шоттки (ДБШ), що визначають ККД ректеного елемента.

1. Вольтамперна характеристика (ВАХ) діода:

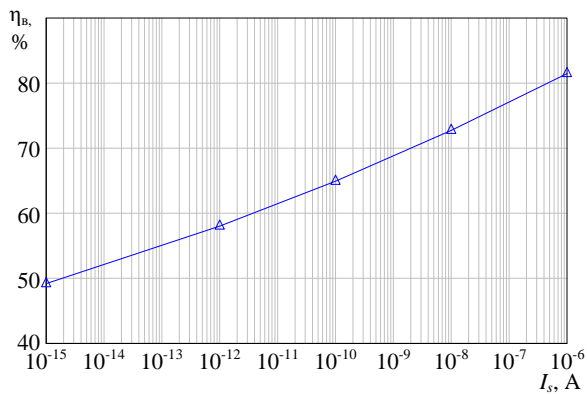
$$i = I_s \left(e^{\frac{q}{kTm}u} - 1 \right), \quad (1)$$

де i – струм через діод; u – напруга на переході діода; I_s – струм насичення; $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана; T – температура переходу (°К); m – коефіцієнт неідеальності характеристики діода.

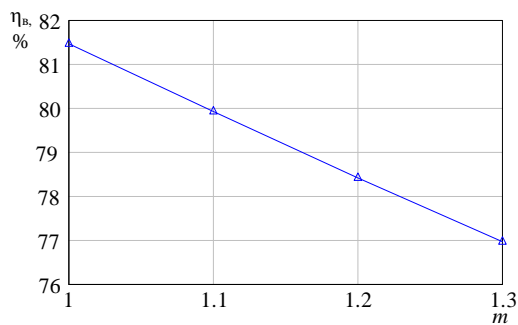
2. Параметри, що характеризують еквівалентну схему діода.

3. Група параметрів, які характеризують припустимі режими та граничні параметри: припустимий діапазон робочих температур, імпульсних і неперервних потужностей, що розсіюються в діоді, гранична частота діода.

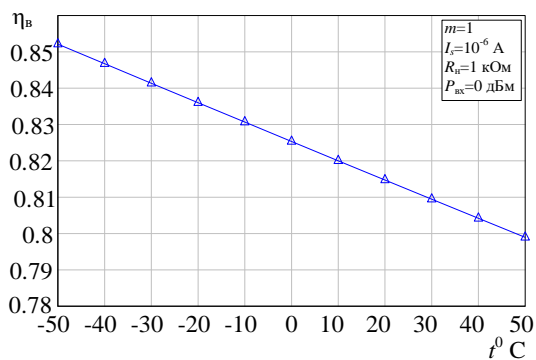
Розглянемо, як змінюється ККД випрямлення ректени при варіації таких параметрів ДБШ, як коефіцієнт неідеальності m та струм насичення I_s у зазначених межах, а також від температури T (рис.2). З рис. 2,а видно, що ККД випрямлення ректени зростає зі збільшенням струму насичення діода. Це пояснюється тим, що струм насичення I_s визначає рівень зворотного струму при відсутності зовнішнього зсуву, що впливає на втрати та здатність діода ефективно проводити струм при низьких рівнях напруги. Чим менший струм насичення, тим більші втрати через зворотну провідність діода, що знижує ефективність випрямлення, особливо при малих вхідних потужностях. Зі збільшенням струму насичення діод починає ефективніше проводити струм, що знижує порогову напругу та втрати на випрямлення. З рис.2,б видно, що зі збільшенням коефіцієнта ідеальності m ККД випрямлення зменшується. Це пояснюється тим, що при зростанні m збільшуються втрати в діоді, пов'язані з рекомбінацією носіїв заряду в області переходу, що призводить до більшого тепловиділення та зростання падіння напруги. В ідеальному діоді ($m=1$) втрати мінімальні, оскільки струм проходить через перехід без значної дисипації енергії. Таким чином, для підвищення ККД ректени важливо обирати діоди з коефіцієнтом ідеальності, якомога ближчим до 1, щоб мінімізувати втрати енергії у випрямлячі.



а



б



в

Рисунок 2 – Результати моделювання залежності ККД випрямлення ректени від параметрів ВАХ діода ($P_{вх}=0$ дБм)

них режимах допоможе оптимізувати компоненти схеми під конкретні умови експлуатації, зокрема передбачити мінімальні теплові втрати при роботі в умовах високих температур.

Список використаних джерел. 1. Алексеев В.О, Грецьких Д.В, Гавва Д.С, Лихограй В.Г. Технології безпровідної передачі енергії // Радіотехніка. 2022. №211. С. 114–132. 2. Алексеев В.О., Грецьких Д.В., Гавва Д.С., Лихограй В.Г., Хань І.А. Ректени систем збору електромагнітної енергії з навколишнього простору // Радіотехніка. 2023. №215. С. 86–105.

З рис. 2, в видно, що температурний режим роботи діодів має значний вплив на ККД випрямлення ректени. При підвищенні температури збільшується струм витоку та знижується бар'єрний потенціал діода, що призводить до зростання втрат на діоді і зниження ефективності випрямлення. Водночас при знижених температурах покращується рухливість носіїв заряду в напівпровіднику, що сприяє зменшенню втрат та підвищенню ККД. Однак слід врахувати, що зміни параметрів інших компонентів випрямних схем, таких як резистори чи конденсатори, також можуть впливати на загальну ефективність ректени.

Для розробників ректен важливо використовувати компоненти з високою температурною стійкістю, такі як ДБШ, здатні працювати в широкому діапазоні температур, або застосовувати альтернативні напівпровідникові матеріали з кращими характеристиками при високих температурах. Для підвищення ефективності випрямлення в умовах температурних коливань рекомендується передбачити систему термостабілізації. Моделювання ректен в різних температурних режимах допоможе оптимізувати компоненти схеми під конкретні умови експлуатації, зокрема передбачити мінімальні теплові втрати при роботі в умовах високих температур.