



ПАРАМЕТРИ ІМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ЛАВИННО-ПРОЛІТНИХ ДІОДАХ ДЛЯ ЗНИЩЕННЯ ШКІДНИКІВ КАРТОПЛІ

Сілі І. І., к.т.н.

Таврійський державний агротехнологічний університет,

e-mail: ivan.sili@tsatu.edu.ua

Анотація – стаття присвячена актуальній проблемі пошуку нових сучасних методів боротьби з колорадським жуком та збереження урожайності посівів картоплі, так у статті запропоновано використання нового інноваційного електромагнітного методу знищення шкідників на основі генераторів НВЧ випромінювання на лавинно-пролітних діодах, приведено результати розрахунку генератора імпульсної дії міліметрового діапазону, який формує імпульси заданої тривалості з необхідним рівнем потужності.

Створення сучасних напівпровідникових джерел потужності в діапазоні НВЧ для впливу на шкідників картоплі в рослинному шарі має базуватися на застосуванні нових напівпровідникових матеріалів і їх композицій, впровадженню нових фізичних принципів для побудови активних елементів, розробці та застосуванні прецизійних технологічних операцій і обладнання, що забезпечують субмікронні розміри елементів напівпровідникових структур, високу надійність з'єднань активних елементів і ланцюгів НВЧ, контроль параметрів і характеристик в процесі експлуатації.

Можливості створення потужних джерел імпульсного випромінювання залежать від наявності відповідних напів-провідникових приладів і схеми підсумовування.

На основі отриманих раніше даних вибираємо корпусні GaAs ЛПД типу 3A762A з параметрами: діапазон частот 20 ГГц; імпульсна потужність $P_i = 60$ Вт; імпульсний струм $I_i = 25$ А; імпульсна напруга $U_i = 50$ В; $Q \geq 160$, ККД = 4%; параметри корпусу: $C_k = 0,3$ пФ, $L_k = 0,4$ нГн, $C = 0,25$ пФ, $R_s = 0,5$ Ом.

Результати чисельного аналізу показали, що забезпечити вимоги, що пред'являються до імпульсних джерел міліметрового діапазону довжин хвиль з вихідною потужністю 300 Вт, можливо на основі однокаскадного підсумовування потужності ($N=6$) в циліндричному резонаторі. Для отримання на виході багатодіодного ($N=12$) імпульсного ЛПД сумарної потужності $P_{вих} = 600$ Вт використовуємо двокаскадну схему підсумовування в загальній розгалуженій схемі. Число каскадів дорівнює 2, для величини втрат $L = 0,2$ дБ.

Наступним етапом розробки є визначення геометричних і енергетичних параметрів синхронізуючого генератора на лавинно-пролітних діодах та перспективи використання резонатора прохідного типу в єдиній конструкції з генератором.



Ключові слова – генератор НВЧ, лавинно-пролітний діод, НВЧ випромінювання, імпульсний генератор, суматор, потужність випромінювання

Постановка проблеми. Створення сучасних напівпровідникових джерел потужності в діапазоні НВЧ для впливу на шкідників картоплі в рослинному шарі має базуватися на застосуванні нових напівпровідникових матеріалів і їх композицій, впровадженню нових фізичних принципів для побудови активних елементів, розробці та застосуванні прецизійних технологічних операцій і обладнання, що забезпечують субмікронні розміри елементів напівпровідникових структур, високу надійність з'єднань активних елементів і ланцюгів НВЧ, контроль параметрів і характеристик в процесі експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час питання оптимальної побудови напівпровідникових джерел потужності в діапазоні НВЧ розглядаються в основному в періодичній літературі. Фактично відсутня навчальна або монографічна література, в якій систематично, з урахуванням нових класів напівпровідникових приладів, розглядаються питання розрахунку і конструювання напівпровідникових джерел потужності в міліметровому діапазоні хвиль.

Лавинно-пролітний діод (ЛПД або ІМРАТТ-діод) - статичний прилад, який широко використовують для генерації і посилення електромагнітних коливань НВЧ діапазону. Відомо, що в основі механізму його роботи лежить ефект динамічної негативної провідності, що виникає при керованому лавинному пробі, викликаному ударною іонізацією в напівпровідниковому кристалі з обернено-зміщеним $p-n$ переходом. Основними факторами, що сприяли бурхливому розвитку ЛПД в діапазоні НВЧ, стали - висока надійність і стійкість до зовнішніх експлуатаційних впливів, а також можливість істотного зменшення масо-габаритних параметрів напівпровідникової апаратури. Фактично, діод є єдиною конструкцією, що включає активний напівпровідниковий прилад і електродинамічну систему, з якою з'єднаний активний елемент. Оптимізація конструкції, схеми побудови і вибір режимів роботи джерела потужності для досягнення необхідних вихідних параметрів вимагає визначення характеристик напівпровідникових приладів і НВЧ ланцюгів, в результаті якого максимально реалізуються можливості активних елементів [1].

В даний час існують роботи [2, 3, 4], в яких розглядаються методи розрахунку електродинамічних систем для підсумовування потужності діодів в загальній резонатора системі з роботою кожного діода в режимі



максимальної потужності. Однак в більшості робіт недостатньо приділено уваги теорії аналізу синхронізуючого генератора, частота якого стабілізована резонатором.

Слід зауважити, що важливим фактором для використання потужних імпульсних генераторів ЛПД в НВЧ схемах є врахування особливостей теплового режиму діодів. Для того щоб уникнути перегріву діодів в імпульсному режимі, необхідно мати тривалість імпульсу вхідної потужності менше часу теплової релаксації мезаструктур [5].

Оскільки для даного методу потрібен потужний імпульсний генератор ЛПД міліметрового діапазону довжин хвиль з вихідною НВЧ потужністю, що перевищує 20 Вт, з'ясування умов його перегріву в залежності від тривалості імпульсу буде також актуальним завданням. Достатньо істотним при цьому є також дослідження фізико-хімічних процесів, що виникають в омичних контактах, і їх стійкості до теплових перегрівів, так як багато в чому саме вони визначають катастрофічні відмови ЛПД у виготовлених виробках.

Формулювання цілей статті. Проаналізувати можливість та ефективність застосування генераторів імпульсної дії на лавино-пролітних діодах як нового методу знищення шкідників картоплі, розрахувати параметри генератора та скласти схему каскадного підсумовування потужності генераторів для досягнення необхідної потужності випромінювання міліметрового діапазону.

Виклад основного матеріалу. Проведений аналіз в [6, 7, 8] показав, що для знищення колорадського жука в рослинному шарі картоплі необхідні імпульсні генератори з параметрами:

- частота $f = 20$ ГГц;
- імпульсна вихідна потужність $P_{вих} = 600$ Вт;
- тривалість імпульсу $\tau_u \leq 1 \cdot 10^{-6}$ с;
- шпаруватість імпульсу $Q = \frac{T}{\tau_u} = 160$;
- відносна нестабільність частоти $10^{-6} \dots 10^{-7}$.

Для виконання вимог, щодо вихідної потужності, в генераторах слід застосовувати розгалужену систему суми потужності представлений на рисунку 1.

Вихідна потужність знаходиться за основними параметрами, які визначають ефективність каскадного підсумовування потужності діодів: тип і кількість діодів; ККД підсумовування потужності; число каскадів розгалуженого суматора.

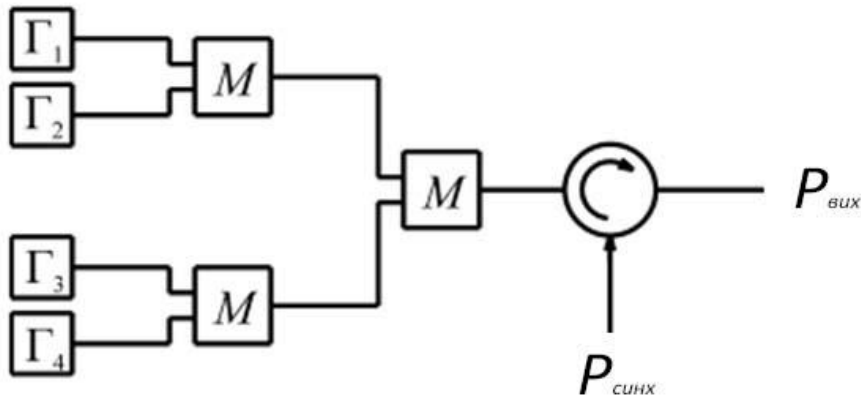


Рис.1. Розгалужена схема каскадного підсумовування потужності генераторів

Число діодів суматора визначимо з виразу

$$N = \frac{P_{вих}}{\eta_{\Sigma} \cdot P_i}, \quad (1)$$

де $P_{вих}$ – необхідна імпульсна потужність на виході суматора;

N - число діодів;

P_i – номінальна імпульсна потужність діода;

η_{Σ} - коефіцієнт корисної дії суматора.

Число каскадів розгалуженого суматора потужності знаходимо з рівняння

$$P_{вв} = P_i \cdot 2 \cdot L, \quad (2)$$

де k – число каскадів розгалуженого суматора;

L – втрати на одному суматорі.

Число діодів в одному каскаді буде визначатися рівнянням:

$$n = \frac{N}{k}, \quad (3)$$

Експериментальні розробки розгалужених суматорів потужності виявили їх основні особливості [6]:

- найефективніше дані суматори використовуються в режимі зовнішньої синхронізації;

- ККД підсумовування зменшується при збільшенні числа каскадів.

У зв'язку з цим, для досягнення високих рівнів потужності і ККД джерел НВЧ випромінювання, великий сенс набуває поєднання методів



каскадного підсумовування діодів в єдиній електродинамічній системі з методами підсумовування в розгалужених системах. Такі суматори ефективні в режимі зовнішньої синхронізації при максимальній щільності розміщення діодів, мінімальних габаритах, допустимому тепловому режиму [6, 9].

Основне призначення синхронізованих генераторів – отримання високостабільних коливань в робочому діапазоні, які мало залежать від впливу дестабілізуючих зовнішніх факторів. Стабільність частоти генераторів визначається сукупністю факторів: шумовими процесами за рахунок флуктуацій носіїв заряду, зміною напруги живлення і температури навколишнього середовища, впливом зовнішніх кіл, зокрема навантаження, процесами старіння пасивних елементів схеми генератора.

У синхронізованих генераторах висока стабільність частоти коливань досягається шляхом синхронізації коливань автогенератора зовнішнім сигналом з малою нестабільністю частоти і зниженим рівнем шумів. У режимі синхронізації смуга синхронізації $\Delta f_{\text{синх}}$ (смуга захоплення частоти автоколивань частотою коливань зовнішнього сигналу) обмежена і залежить від потужності синхронізуючого сигналу $P_{\text{синх}}$, котра знаходиться з виразу наступним чином [9]:

$$P_{\text{синх}} = \frac{P_{\text{вих}}(1 - \eta_{\Sigma})}{\eta_{\Sigma}}, \quad (4)$$

де $P_{\text{вих}}$ – максимальне значення потужності на виході синхронізуючого каскаду;

$P_{\text{синх}}$ – синхронізуюча потужність.

Зазвичай потужність синхронізуючого сигналу у багато разів менше потужності автогенератора. Власна частота коливань автогенератора f і частота зовнішнього сигналу $f_{\text{синх}}$ можуть мати близькі значення ($f \approx f_{\text{синх}}$) або перебувати в кратному співвідношенні $f = n \cdot f_{\text{синх}}$, де $n = 1, 2, 3, \dots$

Створення потужних джерел імпульсного випромінювання обумовлена наявністю відповідних напівпровідникових приладів і схем підсумовування. Таким чином, при поєднанні методів каскадного підсумовування діодів в єдиній системі резонатора з методами підсумовування в розгалужених системах вирішується актуальне завдання підвищення рівня потужності, надійності і стійкості імпульсних напівпровідникових генераторів НВЧ діапазону [10].

Можливості створення потужних джерел імпульсного випромінювання залежать від вибору відповідних напівпровідникових



приладів і схеми підсумовування. На основі отриманих раніше даних вибираємо корпусні *GaAs* ЛПД типу 3A762A з параметрами: діапазон частот 20 ГГц; імпульсна потужність $P_i = 60$ Вт; імпульсний струм $I_i = 25$ А; імпульсна напруга $U_i = 50$ В; $Q \geq 160$, ККД = 4%; параметри корпусу: $C_k = 0,3$ пФ, $L_k = 0,4$ нГн, $C = 0,25$ пФ, $R_s = 0,5$ Ом.

Потужність, споживана ЛПД:

$$\begin{aligned} P_0 &= I_i U_i, \\ P_0 &= 25 \cdot 50 = 1250 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (5)$$

Електронний ККД діода:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= P_i / P_0, \\ \eta_1 &= 60 / 1250 = 0,048. \end{aligned} \quad (6)$$

Повний електронний ККД одно-діодного генератора.

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_1 \eta, \\ \eta &= 0,048 \cdot 0,7 = 0,035. \end{aligned} \quad (7)$$

Визначимо число діодів, необхідних для отримання на виході суматора потужності $P_{вих} = 600$ Вт, приймаючи $\eta_\Sigma = 0,8$ і отримуємо

$$\begin{aligned} N &\geq P_{вих} / \eta_\Sigma \cdot P_i, \\ N &\geq 600 / 0,8 \cdot 60 = 12,5. \end{aligned} \quad (8)$$

Вибираємо $N = 12$.

Результати чисельного аналізу показали, що забезпечити вимоги, що пред'являються до імпульсних джерел міліметрового діапазону довжин хвиль з вихідною потужністю 300 Вт, можливо на основі однокаскадного підсумовування потужності ($N = 6$) в циліндричному резонаторі. Для отримання на виході багатодіодного ($N = 12$) імпульсного ЛПД сумарної потужності $P_{вих} = 600$ Вт використовуємо двокаскадну схему підсумовування в загальній розгалуженій схемі. Число каскадів дорівнює 2, для величини втрат $L = 0,2$ дБ.

Структурна розгалужена система підсумовування потужності каскадних суматорів ЛПД представлена на рисунку 2.

Аналіз показав, що основною причиною, що приводить до істотних змін синхронного режиму генераторів, є ефекти взаємної синхронізації безперервного синхронізуючого і імпульсного, який потрібно синхронізувати генераторів при слабкій розв'язці між ними. Тому рівень необхідної розв'язки між каскадами повинен бути не менше 40 дБ.

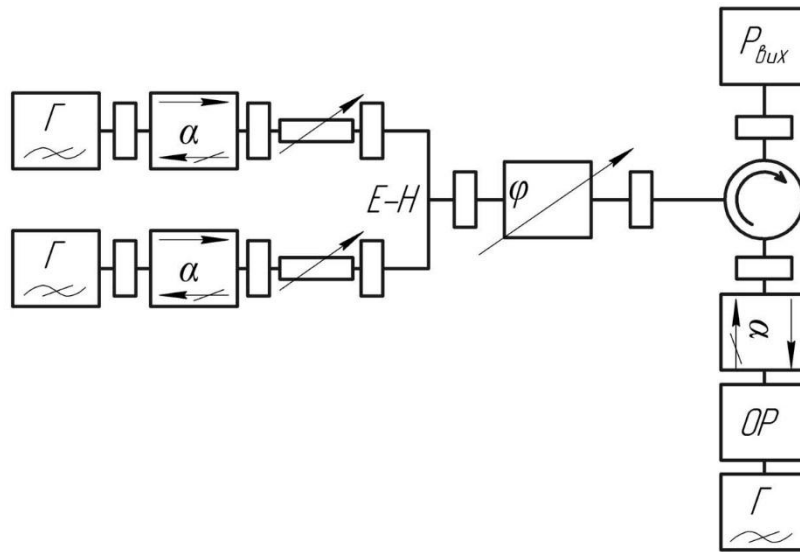


Рис. 2. Структурна розгалужена система підсумовування потужності каскадних суматорів ЛПД в режимі синхронізації зовнішнім сигналом

При розробці суматора потужності доречно використовувати стандартні хвильові елементи (рис. 3): феритові вентиля, циркулятори, атенюатори, фазообертачі, трійники.

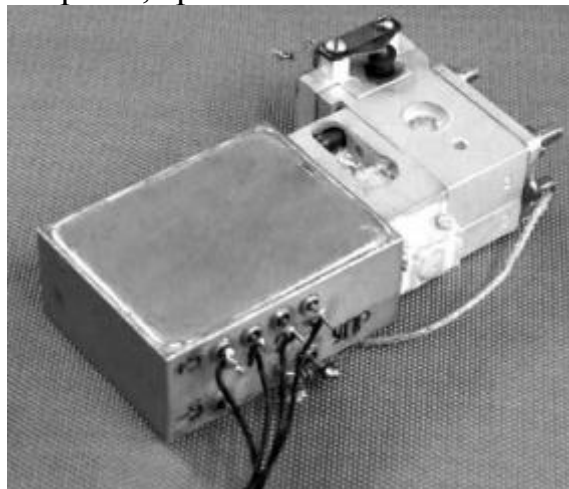


Рис.3. Макет генератора на ЛПД в режимі синхронізації зовнішнім сигналом

Висновки. В результаті проведеного аналізу в статті запропоновано використовувати в якості джерела потужного міліметрового випромінювання для знищення шкідників у рослинному шарі картоплі двокаскадну систему генераторів на дванадцяти корпусних лавинно-пролітних діодах *GaAs* типу 3A762A з наступними параметрами: потужність $P=600$ Вт, тривалість радіоімпульсу $t=10^{-6}$ с, шпаруватість $Q=160$, частота заповнення радіоімпульсів $f=20$ ГГц.

Визначено, що для досягнення високої стабільності частоти



коливань, слід використовувати синхронізацію коливань автогенератора зовнішнім сигналом синхронізованого генератора з малою нестабільністю частоти і зниженим рівнем шумів. В режимі зовнішньої синхронізації суматори найбільш ефективні при максимальній щільності розміщення діодів, мінімальних габаритах та допустимому тепловому режиму.

Наступним етапом розробки є визначення геометричних і енергетичних параметрів синхронізуючого генератора на лавинно-пролітних діодах та перспективи використання резонатора прохідного типу в єдиній конструкції з генератором.

Список літератури

1. *Касаткин Л. В.* Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн / *Л. В. Касаткин, В. Е. Чайка.* – Севастополь: Вебер, 2006. – 319 с.
2. *Макри Д. И.* Исследования нетепловых резонансных эффектов мм-излучения как начало новой биофизики / *Д. И. Макри* // ТИИЭР, 1980. – Т. 68, № 1. – С. 40 – 48.
3. *Zhang W.* S-parameter based device-level C-V measurement of p-i-n single-drift IMPATT diode for millimeter-wave applications / *W. Zhang, M. Oehme, K. Kostecky.* // IEEE. – 2016. – С. 53–65.
4. *Midford T. A.* Millimeter wave CW IMPATT diodes and oscillators / *T. A. Midford, R. L. Bernick.* // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1979. – С. 483–492.
5. *Губанов В. П.* Генерация мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения / *В. П. Губанов, С.Д. Коровин, И. В. Пегель* // Письма в ЖТФ. – 1994. – Т. 20, № 14. – С. 89 – 93.
6. *Сілі І. І.* Енергоінформаційна радіоімпульсна біотехнологія і електронні системи знищення шкідників картоплі : дис. канд. техн. наук : 05.11.17 / *Іван Іванович Сілі*– Харків, 2015. – 159 с.
7. *Сили И. И.* Теоретический анализ процесса взаимодействия радиоимпульсов с колорадскими жуками в растительной среде картофеля / *Иван Иванович Сили.* // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – №4. – С. 55–59.
8. *Сілі І. І.* Визначення параметрів електродинамічної моделі рослинного середовища картоплі з колорадським жуком / *Іван Іванович Сілі.* // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2016. – №242. – С. 256–261.
9. *Сили И. И.* Применение информационно-энергетических излучений для угнетения репродуктивной способности колорадского



жука / *Иван Иванович Сили*. // Проблемы энергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка. – 2015. – С. 47–49.

10. *Сили И. И.* Параметры и стабильность частоты диодного генератора с резонатором проходного типа / *И. И. Сили, А. Д. Черенков*. // Национальний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – 2015. – №9. – С. 53–59.

ПАРАМЕТРЫ ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ЛАВИННО-ПРОЛЕТНЫХ ДИОДАХ ДЛЯ УНИЧТОЖЕНИЯ ВРЕДИТЕЛЕЙ КАРТОФЕЛЯ

И. И. Сили

Аннотация - статья посвящена актуальной проблеме современности - поиск новых современных методов борьбы с колорадским жуком и сохранение урожайности посевов картофеля. В статье предложено использование нового инновационного электромагнитного метода уничтожения вредителей на основе генераторов СВЧ излучения на лавинно-пролетных диодах, приведены результаты расчета генератора импульсного действия миллиметрового диапазона, который формирует импульсы заданной длительности с необходимым уровнем мощности.

Создание современных полупроводниковых источников мощности в диапазоне СВЧ для воздействия на вредителей картофеля в растительном слое должно базироваться на применении новых полупроводниковых материалов и их композиций, внедрению новых физических принципов для построения активных элементов, разработке и применении прецизионных технологических операций и оборудования, обеспечивающих субмикронные размеры элементов полупроводниковых структур, высокую надежность соединений активных элементов и цепей СВЧ, контроль параметров и характеристик в процессе эксплуатации.

Возможности создания мощных источников импульсного излучения зависят от наличия соответствующих полупроводниковых приборов и схемы суммирования.

На основе полученных ранее данных выбираем корпусной GaAs ЛПД типа 3A762A с параметрами: диапазон частот 20 ГГц; импульсная мощность $P_i = 60$ Вт; импульсный ток $I_i = 25$ А; импульсное напряжение $U_i = 50$ В; $Q \geq 160$, КПД = 4%; параметры корпуса: $C_k = 0,3$ пФ, $L_k = 0,4$ нГн, $C = 0,25$ пФ, $R_s = 0,5$ Ом.

Результаты численного анализа показали, что обеспечить требования, предъявляемые к импульсным источникам миллиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью 300 Вт, возможно на основе однокаскадного суммирования мощности ($N = 6$) в цилиндрическом резонаторе. Для получения на выходе многодиодного ($N = 12$) импульсного ЛПД суммарной мощности $P_{\text{вых}}=600$ Вт используем двухкаскадную схему суммирования в общей разветвленной схеме. Число каскадов равно 2, для величины потерь $L = 0,2$ дБ.

Следующим этапом разработки является определение геометрических и энергетических параметров синхронизирующего генератора на лавинно-



пролетных диодах и перспективы использования резонатора проходного типа в единой конструкции с генератором.

Ключевые слова: генератор СВЧ, лавинно-пролетный диод, СВЧ излучение, импульсный генератор, сумматор, мощность излучения

PARAMETERS OF THE IMPULSE GENERATOR BASED ON IMPATT DIODES FOR THE POTATO'S PESTS EXTERMINATION PURPOSE

I. Sili

Summary

The article is devoted to the main problem of the present times - the search for the new modern methods to combat with the Colorado beetle and to preserve the productivity of potato crops. The article proposes the usage of a new innovative electromagnetic method to exterminate potato's pests based on microwave radiation generators with IMPATT diodes inside. The results of the calculation the impulsive impact generator of the millimeter range, which generates impulses of a given duration with the required power level were showed.

Creation of modern semiconductor power sources in the microwave range for the potato pests extermination in the plant layer should be based on the usage of new semiconductor materials and their compositions, the introduction of new physical principles for the construction of active elements, the development and application of precision technological operations and equipment that provide sub-micron sizes of elements semiconductor structures, high reliability of active elements connections and microwave chains, control of parameters and characteristics in the exploitation process.

Possibilities of creation powerful pulsed radiation sources depend on the availability of appropriate semiconductor devices and the scheme of summation.

Based on previous calculation we choose GaAs 3A762A type of IMPATT diodes with next parameters: the frequency range is 20 GHz; pulse power is $P_i=60$ W; pulse current is $I_i=25$ A; pulse voltage is $U_i=50$ V; $Q \geq 160$, Efficiency = 4%; housing parameters: $c_k=0,3$ pF, $L_k=0,4$ nH, $C=0,25$ pF, $R_s=0,5$ Ohm.

The results of analysis showed to provide the requirements for pulsed sources of millimeter wavelength range with a power output of 300 Watts is possible on the basis of a single-cascade power summation ($N = 6$) in a cylindrical resonator. To get an output multi-diode ($N = 12$) IMPATT generator of total output power $P_{out} = 600$ Watts, we use a two-stage summation scheme in the general circuit. The number of cascades is 2, for the loss value $L = 0,2$ dB.

The next stage of development is the determination of the geometrical and energy parameters of the synchronize generator based on IMPATT diodes and the prospect of usage a passage-type resonator in a same single design with a generator.

Keywords: microwave generator, IMPATT diode, ultra-high frequency UHF radiation, pulse generator, an adder, radiation power.