

Д. т. н. Ю. Є. НІКОЛАЄНКО, к. т. н. О. В. БАРАНЮК, С. А. РЕВА, к. т. н. В. А. РОГАЧОВ

Україна, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського»

E-mail: yunikola@ukr.net

CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КОРПУСА-РАДІАТОРА ПЕРЕДАВАЛЬНОГО МОДУЛЯ АФАР З ПОВІТРЯНИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ

Наведено результати комп'ютерного моделювання розподілу температури монтажної поверхні основи корпусу-радіатора, на якій встановлено вісім елементів з локальним тепловиділенням кожного 28 Вт. На протилежній стороні основи корпусу-радіатора виконані ребра охолодження. Оребрена поверхня обдувається повітряним потоком з температурою на вході 40°C. Моделювання проведене для трьох значень швидкості повітря в міжреберних каналах: 1, 6 і 10 м/с. Показано, що за швидкості 1 м/с спостерігається максимальне значення температури монтажної поверхні основи корпусу-радіатора, яке становить 90,1°C. Збільшення швидкості повітря до 10 м/с дозволяє знизити температуру в місці установки НВЧ-елементів до 72,1°C. Запропоновано нове технічне рішення для подальшого підвищення ефективності повітряної системи охолодження та зниження температури монтажної поверхні корпусу-радіатора.

Ключевые слова: CFD-моделювання, вихідний підсилювач потужності, радіатор, повітряне охолодження, температурне поле.

Сучасні радіолокаційні станції широко застосовуються для одержання зображень земної поверхні з високою роздільною здатністю. Це дозволяє вирішувати завдання прогнозування погоди, дослідження природних ресурсів, геологорозвідки, оцінки біоресурсів, створення топографічних карт, моніторингу катастроф, екологічних забруднень та ін. За допомогою радіолокаційних станцій також можна виявляти повітряні, морські й наземні рухомі об'єкти і з високою точністю визначати їхні координати та параметри руху.

З метою розширення функціональних можливостей радіолокаційних станцій в останні роки широко використовуються активні фазовані антенні решітки (АФАР) [1]. До складу АФАР входить велика кількість (від десятків до декількох тисяч) приймально-передавальних модулів [2]. У деяких модифікаціях АФАР приймальні та передавальні модулі виконуються у вигляді окремих блоків, і більше тепла виділяють другі. Основна кількість теплоти виділяється у вихідних підсилювачах потужності передавальних модулів. Конструктивно вихідні підсилювачі потужності являють собою основу з теплопровідного матеріалу (найчастіше з алюмінієвого сплаву), на одній стороні якої методом фрезерування виконують поглиблення з екрануючими стінками для встановлення НВЧ-елементів, а на іншій виконують ребра охолодження. Після установки електронні елементи герметично закривають

кришками. Приклад конструктивного виконання вихідного підсилювача потужності сантиметрового діапазону довжини хвиль показаний на **рис. 1** [3]. Даний підсилювач потужності може працювати як в імпульсному, так і в безперервному режимах, у безперервному вихідна потужність становить 11 Вт.

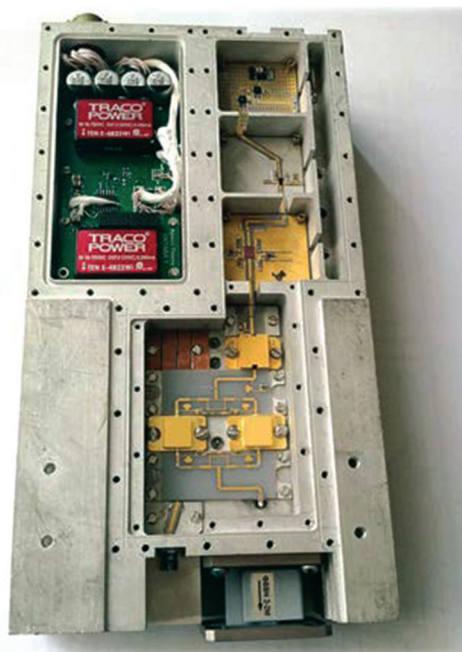


Рис. 1. Зовнішній вигляд підсилювача потужності Х-діапазону зі знятими кришками [3]

Для поліпшення розсіювання теплоти в даній конструкції підсилювача потужності на нижній стороні основи передбачений радіатор з 17 ребрами висотою 24 мм і товщиною 2 мм на половину довжини корпусу. Обдування радіатора здійснюється потоком повітря зі швидкістю 0,5 м/с, що забезпечує температуру корпусу підсилювача не вище 85°C за температури навколишнього середовища 20°C [3].

В інших конструкціях передавальних модулів для розподілу локального теплового потоку декілька тепловиділяючих НВЧ-елементів (транзисторів або монолітних інтегральних схем) установлюють із забезпеченням теплового контакту на загальному розсіювачі теплового потоку, виконаному з міді, який в свою чергу встановлюють на охолоджувану основу модуля з алюмінієвого сплаву. Такі мідні розсіювачі теплового потоку з НВЧ-елементами та друкованими платами називають підсилювальними субмодулями або палетами (рис. 2) [4, 5]. До складу одного передавального модуля може входити декілька палет.

Особливо актуальною задачею під час модернізації передавальних модулів АФАР є підвищення ефективності охолодження активних НВЧ-елементів (транзисторів або монолітних інтегральних схем) вихідних підсилювачів потужності. Це обумовлено переходом з арсенід-галієвої елементної бази на більш високочастотну нітрид-галієву, яка є і більш потужною, внаслідок чого істотно підвищується питома густина тепловиділення та загальна потужність передавального модуля [6, 7]. Якщо рівень потужності підсилювачів на арсеніді галію становить порядку 10 Вт, то на нітриді галію це вже 15–20 Вт і більше [8, 9].

Теплота, що виділяється активними НВЧ-елементами, призводить до підвищення їхньої температури та зниження надійності роботи. Тому під час модернізації конструкцій переда-

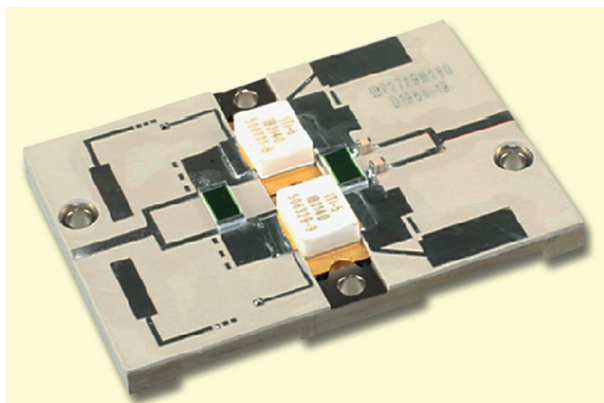


Рис. 2. Палета із двома НВЧ-транзисторами компанії Integra Technologies, Inc., США [4, 5]

вальних модулів АФАР, що супроводжується підвищенням як питомої, так і загальної потужності тепловиділення, питанням забезпечення нормального теплового режиму активних НВЧ-елементів слід приділяти особливу увагу. Під час досліджень теплових і аеродинамічних процесів, які протікають у засобах тепловідведення, достатньо широко використовується CFD-моделювання [10–14]. Це дозволяє уникнути витрат на виготовлення експериментального зразка та його експериментальне дослідження.

Ціль даної роботи — за допомогою CFD-моделювання оцінити тепловий режим корпусу радіатора передавального модуля з вісьмома потужними активними НВЧ-елементами, установленими безпосередньо на його монтажній поверхні.

Вибір системи охолодження та конструкції передавального модуля

Для забезпечення нормального теплового режиму передавальних і приймально-передавальних модулів АФАР використовуються повітряні [15, 16] або рідинні [17, 18] системи охолодження. Рідинні значно ефективніші і застосовуються в тих випадках, коли повітряні не в змозі забезпечити нормальний тепловий режим активних НВЧ-елементів. Разом з тим, наявність рідкого теплоносія ускладнює конструкцію АФАР, оскільки виникає необхідність застосування насоса для його прокачування та використання теплообмінного та терморегуючого устаткування для підтримання заданої температури теплоносія на вході каналів охолодження передавального модуля. Також необхідно використовувати різні з'єднувачі, що не проливаються, забезпечити надійну герметизацію рідинної магістралі, працездатність за мінусової температури навколишнього середовища, корозійну сумісність конструкційних матеріалів і теплоносія тощо. Усе це робить рідинні системи охолодження не тільки складними, але й дорогими у виготовленні та експлуатації.

Найбільш простими з погляду конструктивної реалізації та експлуатації, а також дешевими, є повітряні системи охолодження двох видів — з природною конвекцією повітря та з примусовою. Враховуючи низьку ефективність перших, для забезпечення нормального теплового режиму передавальних та приймально-передавальних модулів зазвичай використовують системи охолодження з примусовою конвекцією.

Виходячи зі сказаного, для використання в передавальному модулі було обрано повітряну систему охолодження з примусовою конвекцією повітря.

Для дослідження теплового режиму було обрано конструкцію передавального модуля з корпусом-радіатором.

Найбільш тепловиділяючі СВЧ-елементи модуля встановлюють в ряд на монтажній стороні основи перпендикулярно її довгій стороні. Як показали дослідження [19, 20], оптимальним є розташування тепловиділяючих елементів приблизно на середині довжини радіатора.

Теплова модель корпуса-радіатора

Конструктивно передавальний модуль виконаний у вигляді корпуса-радіатора прямокутної форми розмірами 490×275×52 мм (рис. 3).

На монтажній стороні несучої основи корпуса-радіатора в поглибленнях з забезпеченням надійного теплового контакту встановлені електронні вузли і блоки. Найбільш тепловидільними електронними компонентами модуля є вісім НВЧ-транзисторів вихідного підсилювача потужності передавального модуля. Розсіювана кожним НВЧ-транзистором потужність складає 28 Вт, сумарна — 224 Вт. Зазначимо, що на рис. 3 електронні блоки і НВЧ-транзистори не показано, а вказано лише місця установки останніх (позиція 3). Розміри поверхні тепловідведення НВЧ-транзистора, що контактує з монтажною поверхнею несучої основи, були обрані рівними 10×10 мм.

На протилежному боці несучої основи корпуса-радіатора виконано 29 поздовжніх ребер охолодження висотою 19 мм, довжиною 396 мм. Товщина кожного ребра становить 2 мм, відстань між сусідніми ребрами (ширина повітряного каналу) — 6 мм. Товщина несучої основи, на якій виконано ребра охолодження, — 12 мм. Матеріал радіатора — алюмінієвий сплав АМг 3 з коефіцієнтом теплопровідності 132 Вт/(м·°С).

Обребрена сторона основи є поверхнею теплообміну корпуса-радіатора передавального модуля і під час роботи АФАР обдувається потоком

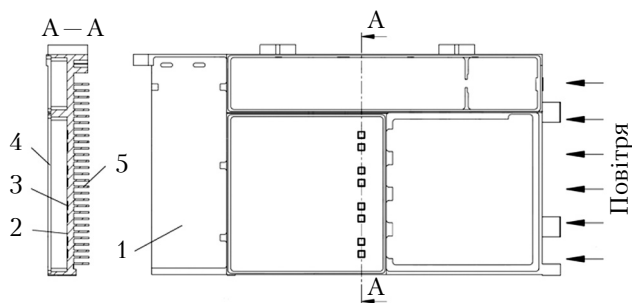


Рис. 3. Конструктивна схема корпуса-радіатора:

1 — несуча основа; 2 — монтажна сторона основи; 3 — місце установки тепловиділяючого елемента; 4 — місце для установки кришки; 5 — ребро охолодження

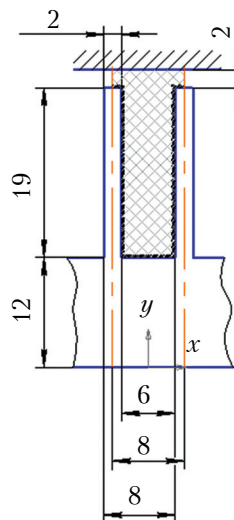


Рис. 4. Місцевий поперечний розріз несучої основи з ребрами

охолоджуючого повітря з температурою на вході в канали поверхні теплообміну 40°С.

Вважається, що поверхня корпуса-радіатора, крім оребреної поверхні теплообміну несучої основи, є адіабатною (теплоізованою), а відстань між торцями ребер і кришкою суміжного передавального модуля становить 2 мм.

Моделювання теплового поля корпуса-радіатора виконане методом обчислювальної гідродинаміки. На рис. 4 наведено геометричні розміри одного з міжреберних каналів для розрахунку його еквівалентного діаметру, необхідного для обчислення коефіцієнтів тепловіддачі.

Результати моделювання

За умов, зазначених вище, було проведено CFD-моделювання для трьох значень швидкості $V_{\text{ох}}$ охолоджуючого повітряного потоку в міжреберних каналах корпуса-радіатора — 1, 6, 10 м/с. Аналіз результатів показав, що найбільші значення температури в місцях установки тепловиділяючих НВЧ-транзисторів спостерігаються за швидкості повітряного потоку в міжреберних каналах 1 м/с (див. рис. 5, а на стор. 1 обкладинки), а максимальна температура сягає 90,1°С. Оцінімо, якою буде в цьому випадку температура напівпровідникового кристалу НВЧ-транзистора за умови установки його на поверхню корпуса-радіатора через шар теплопровідної пасти КПТ-8 товщиною 0,2 мм із коефіцієнтом теплопровідності 0,7 Вт/(м·°С).

Теплота від напівпровідникового кристалу до корпуса-радіатора передається теплопровідністю через внутрішній тепловий опір НВЧ-транзистора і через контактний тепловий опір між корпусом НВЧ-транзистора і поверхнею несучої основи. Враховуючи це, нескладно ви-

значити, що при внутрішньому тепловому опорі НВЧ-транзистора, наприклад, $0,25^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, перепад температури між напівпровідниковим кристалом і корпусом НВЧ-транзистора складе 7°C , а перепад температури між корпусом НВЧ-транзистора і несучою основою корпусу-радіатора при густині теплового потоку в зоні контакту $28 \text{ Вт}/\text{см}^2 - 80^{\circ}\text{C}$.

Таким чином, температура напівпровідникового кристалу НВЧ-транзистора за швидкості $V_{\text{ox}} = 1 \text{ м}/\text{с}$ складе $90,1+7,0+80,0 = 177,1^{\circ}\text{C}$. Очевидно, що навіть за використання нітрид-галієвого НВЧ-транзистора таке високе значення температури кристалу не бажане з міркування надійності його роботи.

Найбільш простим способом зниження температури напівпровідникового кристалу є збільшення швидкості охолоджуючого повітряного потоку.

Збільшення V_{ox} з 1 до 6 м/с дозволяє інтенсифікувати теплообмін і знизити максимальну температуру монтажної поверхні в місцях установки НВЧ-транзисторів на 13°C і тим самим знизити температуру напівпровідникового кристалу з $177,1$ до $164,1^{\circ}\text{C}$.

Подальше збільшення швидкості повітряного потоку до 10 м/с (див. рис. 5, б на стор. 1 обкладинки) дозволяє ще більше — на 18°C знизити температуру основи корпусу-радіатора та, відповідно, температуру кристалу до $159,1^{\circ}\text{C}$. Слід, однак, зазначити, що для надійної роботи НВЧ-транзисторів це не є достатнім, але й подальше збільшення швидкості повітряного потоку небажане через ріст енерговитрат на його прокачування.

Новим технічним рішенням тут може стати вбудовування плоских теплових труб (ТТ) у тіло несучої основи корпусу-радіатора таким чином, щоб тепловиділяючі елементи вихідного підсилювача потужності перебували в тепловому контакті із зонами нагрівання ТТ, а зони охолодження ТТ знаходились у тілі несучої основи в оребреній області. Оскільки ефективна теплопровідність теплових труб на порядки перевищує теплопровідність таких металів, як мідь і алюміній [21], це дозволить розосередити локальний тепловий потік від НВЧ-транзисторів на всю оребрену поверхню теплообміну з мінімальним перепадом температури по довжині ребер і тим самим підвищити теплорозсіювальну здатність віддалених частин ребер і додатково знизити температуру в місцях установки НВЧ-транзисторів.

Напрямок подальших досліджень є моделювання запропонованого технічного рішення з метою визначення ефективності зниження температури монтажної поверхні корпусу-радіатора

та, відповідно, температури напівпровідникового кристалу НВЧ-транзисторів вихідного підсилювача потужності передавального модуля.

Заключення

CFD-моделювання температурного поля однієї з можливих конструкцій корпусу-радіатора передавального модуля показало, що за рахунок підвищення швидкості повітря в міжреберних каналах з 1 до 10 м/с за його температури на вході 40°C можна знизити температуру напівпровідникового кристалу НВЧ-транзисторів на 18°C . Для подальшого підвищення ефективності повітряного охолодження передавального модуля перспективним бачиться вмонтовування теплових труб у тіло несучої основи корпусу-радіатора передавального модуля. Це дозволить розосередити локальний тепловий потік від НВЧ-транзисторів на всю поверхню корпусу-радіатора і в результаті знизити максимальну температуру напівпровідникового кристалу НВЧ-транзисторів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Radar technology advancements and new applications (Pasternack Enterprises, Inc., Irvine, Calif.) // Microwave Journal. — 2017. — Vol. 60, iss. 3. — P. 82–96. <https://www.pasternack.com/t-Radar-Technology-Advancements-and-New-Applications.aspx>
2. Rathod Somsing, Sreenivasulu K., Beenamole K. S., Ray K. P. Evolutionary trends in transmit/receive module for active phased array radars // Defence Science Journal. — 2018. — Vol. 68, № 6. — P. 553–559. — <https://doi.org/10.14429/dsj.68.12628>
3. Борисов О. В., Зубков А. М., Иванов К. А., Миннебаев В. М., Редька Ал. В. Широкополосный 70-ваттный GaN усилитель мощности X-диапазона // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. — 2014. — Вып. 2 (233). — С. 4–9.
4. Баталя Б. Д., Бергер Д., Титизан Д. Эволюция технологии радарных систем S-диапазона: уменьшение общей стоимости за счет увеличения степени интеграции. Пример Integra Technologies // Компоненты и технологии. — 2009. — № 12. — С. 56–60.
5. Колотун О. Передовые технологии производства СВЧ-транзисторов компании «Integra Technologies, Inc.» для радарных систем // CHIP NEWS Украина. — 2010. — № 8 (98). — С. 8–16.
6. Кулиев М. В. Обзор современных GaN транзисторов и направления развития // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. — 2017. — Вып. 2 (245). — С. 18–28.
7. Крахин О.И., Радченко В.П. Проблема теплоотвода приемо-передающих модулей и АФАР с высоким уровнем теплового излучения // Сборник докладов III Всероссийской конфер. «Радиолокация и радиосвязь». — РФ, Москва. — 2009. — С. 716–719. — <http://jre.cplire.ru/jre/library/3conference/pdf/files/s007.pdf>
8. Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Куликов А.А. Хоодаков А.М. Моделирование и исследование тепловых режимов выходных усилителей СВЧ приемо-передающих модулей для АФАР // Вузовская наука в современных условиях. Сб. материалов 50-й науч.-технич. конфер. Ч. 2. — РФ, Ульяновск. — 2016. — С. 37–40.

9. Тимошенко В.П., Хлыбов А.И., Родионов Д.В. и др. Исследование теплового режима СВЧ усилителей мощности X диапазона // VIII Всероссийская научно-техническая конфер. «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2018). — РФ, Москва. — 2018. — Вып. 3. — С. 98–102. — <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-3-98-102>

10. Трофимов В.Е., Павлов А.Л. Интенсификация теплопередачи в жидкостных теплообменниках с кавернаштыревым оребрением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2016. — № 1. — С. 23–26. — <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.1.23>

11. Трофимов В.Е., Павлов А.Л., Мокроусова Е.А. CFD-моделирование радиатора для воздушного охлаждения микропроцессоров в ограниченном пространстве // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2016. — № 6. — С. 30–35. — <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.6.30>

12. Трофимов В.Е., Павлов А.Л., Сторожук А.С. CFD-моделирование импактно-струйного радиатора для проведения термотренировки микропроцессоров // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2018. — № 5–6. — С. 30–36. — <https://doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.30>

13. Баранюк А.В., Николаенко Ю.Е. CFD-моделирование теплогидравлических характеристик развитых поверхностей с миниканалами // Молодой ученый. — 2018. — № 12(64). — С. 224–228. — <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2018-12-64-56>

14. Baranyuk A.V., Nikolaenko Yu.E., Rohachev V.A., Terekh O.M., Krukovsky P.G. Investigation of the flow structure and heat transfer intensity of surfaces with split plate finning // Thermal Science and Engineering Progress. — 2019. — Vol. 11. — P. 28–39. — <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.03.018>

15. Драк О.Т., Жигалов В.Г., Задорожный А.И., Парнес М.Д. Опыт решения задачи теплоотвода от передающего

модуля АФАР // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сб. статей IV Всероссийской конференции. — РФ, Санкт-Петербург. — 2015. — Т. 1. — С. 292–295.

16. Scott M. SAMPSON MFR active phased array antenna // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. — 2003. — P. 119–123. — <https://doi.org/10.1109/past.2003.1256967>

17. Савенко В.А. Унификация конструкторских решений для построения приемо-передающих модулей АФАР различных диапазонов // Труды Всерос. Конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ». — РФ, Санкт-Петербург. — 2013. — 5 с. — www.mwelectronics.ru/2013/Oral/5/05_Doclad_Savenko-izmenenny%60i%60.pdf

18. Woosang Lee, Joonho So, Junyeon Kim, Byungil Woo, Won Jang, Gyeik Jun, Sungjong Lee. Design of T/R module for the wideband active array antenna // 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. — USA, NM, Albuquerque. — 2006. — <https://doi.org/10.1109/aps.2006.1710665>

19. Youngchan Yoon, Seung-Jae Park, Dong Rip Kim, Kwan-Soo Lee. Thermal performance improvement based on the partial heating position of a heat sink // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2018. — Vol. 124. — P. 752–760. — <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.080>

20. Maguire L., Behnia M., Morrison G. Numerical evaluation of high power amplifier heat sink design options // Proc. of IPACK03 International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition. — USA, Hawaii, Maui, 2003. — Paper No. IPACK2003-35077. — P. 171–181. — <https://doi.org/10.1115/IPACK2003-35077>

21. Reay D.A., Kew P.A., McGlen R.J., Heat pipe: theory, design and applications. — Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2014.

*Дата надходження рукопису
до редакції 02.04 2019 р.*

**Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, А. В. БАРАНЮК,
С. А. РЕВА, В. А. РОГАЧЕВ**

Украина, Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт
имени Игоря Сикорского»
E-mail: yunikola@ukr.net

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КОРПУСА-РАДИАТОРА ПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ АФАР С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Приведены результаты компьютерного моделирования распределения температуры монтажной поверхности основания корпуса-радиатора, на которой установлено восемь тепловыделяющих элементов с локальным тепловыделением каждого по 28 Вт. На противоположной стороне основания корпуса-радиатора выполнены ребра охлаждения. Оребренная поверхность обдувается воздушным потоком с температурой на входе 40°C. Моделирование проведено для трех значений скорости воздушного потока в межреберных каналах: 1, 6 и 10 м/с. Показано, что максимальное значение температуры монтажной поверхности основания корпуса-радиатора, которое составляет 90,1°C, наблюдается при скорости 1 м/с. Увеличение скорости воздуха до 10 м/с позволяет снизить температуру в месте установки СВЧ-элементов до 72,1°C. Для дальнейшего повышения эффективности воздушной системы охлаждения и снижения температуры монтажной поверхности корпуса-радиатора предложено новое техническое решение.

Ключевые слова: CFD-моделирование, выходной усилитель мощности, радиатор, воздушное охлаждение, температурное поле.

CFD-MODELING OF THE TEMPERATURE FIELD
OF THE RADIATOR CASING OF THE TRANSMITTING
MODULE OF THE ACTIVE PHASED
ANTENNA ARRAYS WITH AIR COOLING

Modern radar stations are widely used to obtain images of earth surface with high spatial resolution, to identify moving objects in the air, on sea and on the ground, and allow determining the coordinates and movement parameters accurately. Active phased antenna arrays with large number of transmitting modules are widely used as antenna systems in radar stations. The heat generated by the active microwave elements of the output amplifiers of the transmitting module, leads to an increase in their temperature and to decrease in reliability. In this regard, the task of increasing the cooling efficiency of active microwave elements of the output power amplifiers is important.

The aim of this study is to assess the possibilities of air cooling of the active elements of the output power amplifier in relation to the transition from gallium arsenide to gallium nitride element base with increased heat generation.

This paper presents the results of computer simulation for the temperature field of the mounting base of the radiator casing, on which 8 heat-generating elements with a local heat release of 28 W each are installed. Cooling fins are made on the opposite base of the radiator casing. The finned surface of the radiator casing is blown by an air stream with an inlet air temperature of 40°C. The simulation was carried out for three values of the air flow rate in the interfin channels: 1, 6 and 10 m/s. It is shown that the maximum temperature of the mounting base of the radiator casing is 90.1°C and is observed at an air flow rate of 1 m/s inside the interfin channels. Increasing the air speed up to 10 m/s makes it possible to reduce the temperature at the installation site of the microwave elements down to 72.1°C. A new technical solution was proposed to further improve the efficiency of the applied cooling system and to reduce the temperature of the mounting surface of the radiator casing.

Keywords: CFD-modeling, output power amplifier, radiator, air cooling, temperature field.

REFERENCES

1. Radar technology advancements and new applications (Pasternack Enterprises, Inc., Irvine, Calif.). *Microwave Journal*, 2017, vol. 60, iss. 3, pp. 82-96. <https://www.pasternack.com/t-Radar-Technology-Advancements-and-New-Applications.aspx>
2. Rathod Somsing, Sreenivasulu K., Beenamole K. S., Ray K. P. Evolutionary trends in transmit/receive module for active phased array radars. *Defence Science Journal*, 2018, vol. 68, no. 6, pp. 553-559. <https://doi.org/10.14429/dsj.68.12628>
3. Borisov O. V., Zubkov A. M., Ivanov K. A., Minnabayev V. M., Red'ka Al. V. [Broadband 70-Watt GaN X-Band Power Amplifier]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovyye pribory*, 2014, iss. 2 (233), pp. 4-9. (Rus)
4. Battaglia B. D., Burger J., Titizian J. [The evolution of S-band radar technology: reducing the total cost by increasing the degree of integration. Integra Technologies Example]. *Komponenty i Tekhnologii*, 2009, no 12, pp. 56-60. (Rus)
5. Colotun O. [Advanced technologies for the production of microwave transistors by the company Integra Technologies, Inc. for radar systems]. *CHIP NEWS Ukraine*, 2010, no. 8 (98), pp. 8-16. (Rus)
6. Kuliev M.V. [Overview of today's GaN transistors and development trends]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovyye pribory. Vypusk 2 (245)* 2017, pp. 18-28. (Rus)
7. Krakhin O. I., Radchenko V. P. [The heat removing of send-receive modules (SRM) and APAA (active phased array antenna) with a high level of thermal radiation]. *III all-Russian conference "Radar and radio" – IRE RAS*, 2009, pp. 716-719. (Rus). <http://jre.cplire.ru/jre/library/3conference/pdffiles/s007.pdf>
8. Sergeyev V. A., Tarasov R. G., Kulikov A. A. Khodakov A. M. [Simulation and study of the thermal modes of the output amplifiers of the microwave receiver-transmitting modules for AFAR]. *Proc. of the 50-y Scientific and Technical Conference "Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh". Part 2*, Russia, Ul'yanovsk, UIGTU, 2016, pp. 37-40. (Rus)
9. Timoshenkov V., Khlybov A., Rodionov D., Efimov A., Chaplugin Yu. [Thermo researching of X-band microwave amplifier]. *VIII All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems" (MES-2018)*, Russia, Moscow, 2018, iss. 3, pp. 98-102. (Rus). <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-3-98-102>

10. Trofimov V. Ye., A. L. Pavlov. [Intensification of heat transfer in liquid heat exchangers with dimple-pin finning]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2016, no. 1, pp. 23-26. (Rus) <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.1.23>
11. Trofimov V. E., Pavlov A. L., Mokrousova E. A. CFD-simulation of radiator for air cooling of microprocessors in a limited space. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*. 2016, no. 6, pp. 30-35. (Rus) <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.6.30>
12. Trofimov V. E., Pavlov A. L., Storozhuk A. S. [CFD-simulation of impact jet radiator for thermal testing of microprocessors]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*. 2018, no. 5-6, pp. 30-36. (Rus) <https://doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.30>
13. Baranyuk A.V., Nikolaenko Yu.E. [CFD-modeling of thermal-hydraulic characteristics of developed surfaces with mini-channels]. *Molodiy Vcheniy*, no. 12 (64), pp. 224–228, (Rus). <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.03.018>
14. Baranyuk A.V., Nikolaenko Yu.E., Rohachev V.A., Terekh O.M., Krukovsky P.G. Investigation of the flow structure and heat transfer intensity of surfaces with split plate finning. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2019, no. 11, pp. 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.03.018>
15. Drak O.T., Zhigalov V.G., Zadorozhny A.I., Parnes M.D. [Experience in solving the problem of heat removal from the transmitting module AFAR]. *Collection of articles of the IV All-Russian Conference "Electronics and Microelectronics Microwave"*, Russia, St. Petersburg, 2015, vol. 1, pp. 292-295. (Rus)
16. Scott M. (2003) SAMPSON MFR active phased array antenna. *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, 2003, pp. 119-123. <https://doi.org/10.1109/past.2003.1256967>
17. Savenko V.A. [Unification of design solutions for the construction of receiving and transmitting modules APAA of various ranges]. *Proc. of All-Russian Conference "Electronics and Microelectronics Microwave"*, St. Petersburg, 2013, 5 p. (Rus). www.mwelectronics.ru/2013/Oral/5/05_Doclad_Savenko-izmenenny%60i%60.pdf
18. Woosang Lee, Joonho So, Junyeon Kim, Byungil Woo, Won Jang, Gyeik Jun, Sungjong Lee. Design of T/R module for the wideband active array antenna. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2006, USA, NM, Albuquerque. <https://doi.org/10.1109/aps.2006.1710665>
19. Youngchan Yoon, Seung-Jae Park, Dong Rip Kim, Kwan-Soo Lee. Thermal performance improvement based on the partial heating position of a heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 124, pp. 752-760. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.080>
20. Luke Maguire, Masud Behnia, Graham Morrison. Numerical evaluation of high power amplifier heat sink design options. *Proc. of IPACK03 International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition*, 2003, USA, Hawaii, Maui, paper no. IPACK2003-35077, pp. 171-181. <https://doi.org/10.1115/IPACK2003-35077>
21. Reay D.A., Kew P.A., McGlen R.J. *Heat pipe: theory, design and applications*. Amsterdam, Buterworth-Heinemann, 2014.

Опис статті для цитування:

Ніколаєнко Ю. Є., Баранюк О. В., Рева С. А., Рогачов В. А. CFD-моделювання температурного поля корпус-радіатора передавального модуля АФАР з повітряним охолодженням. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2019, № 1–2, с. 27–33. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.1-2.27>

Cite the article as:

Nikolaenko Yu. E., Baranyuk A. V., Reva S. A., Rohachov V. A. CFD-modeling of the temperature field of the radiator casing of the transmitting module of the active phased antenna arrays with air cooling. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 1–2, pp. 27-33. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.1-2.27>

Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлёв Ю. И. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 3. Методы повышения надежности: монография. — Одесса: Политехперіодика, 2018.

Книга посвящена одной из ключевых проблем проектирования термоэлектрических устройств (ТЭУ) — поиску путей повышения их надежности. Исследованы основные методы повышения показателей надежности ТЭУ: конструктивный, параметрический, структурный и комбинированный. Приведены результаты расчетов основных характеристик и показателей надежности одно- и двухкаскадных ТЭУ в зависимости от геометрии ветвей термоэлементов, токового режима работы, параметров исходных материалов термоэлементов (термоэлектрической эффективности, коэффициента термо-эдс и электропроводности) и проведен анализ полученных результатов. Также рассмотрены простейшие схемы резервирования элементов и проведен сравнительный анализ различных способов включения резерва. Показаны возможности комбинированного (совмещенного) метода повышения показателей надежности ТЭУ путем оценки совместного использования конструктивного и параметрического методов в сравнении с результатами, которые можно получить при их раздельном применении.

Предназначена для инженеров, научных работников, а также студентов соответствующих специальностей, занимающихся вопросами надежности элементов электроники и в целом РЭА, а также разработкой и проектированием термоэлектрических устройств.

