УДК 621.382.8.029.64:004.942

# ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ УСИЛИТЕЛЯ X-ДИАПАЗОНА

Журавлёв В.И., Наумович Н.М., Стежко И.К., Колбун В.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vadzh@bsuir.by

Аннотация: на основе топологической модели конструктива и стационарной тепловой модели заданы начальные и граничные условия реализована феноменологическая модель нестационарного нагрева с изменяемой функцией мощности источника мощного усилителя X-диапазона. Определены целевые показатели и настройка временных шагов для мониторинга температуры компонентов. Показано, что время выхода компонентов на стационарный режим составляет 400–450 с, а тепловые градиенты не превышают критических значений. Модель позволяет прогнозировать нагрев компонентов и оптимизировать режимы работы и конструкцию передающего тракта без дополнительных временных и вычислительных затрат.

Ключевые слова: усилитель X-диапазона; тепловое поле; феноменологическая модель; нестационарный теплоперенос; оптимизация теплового режима, градиент температуры.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные мощные усилители X-диапазона находят широкое применение в радиолокации, системах связи и радиоэлектронной борьбе, где к ним предъявляются жёсткие требования по выходной мощности, надёжности и тепловому режиму. Интенсификация тепловыделения при повышении удельной мощности передающего тракта приводит к росту тепловых нагрузок на электронные компоненты, что делает задачу оценки и прогнозирования теплового состояния конструкции одной из ключевых при проектировании. При этом наибольший интерес представляет не только стационарное распределение теплового поля, но и динамика его формирования, поскольку именно переходные процессы разогрева определяют пиковые температуры, тепловые градиенты и, как следствие, ресурс и безотказность работы изделия [1].

Существующие подходы к тепловому моделированию радиоэлектронных средств, основанные на детальном численном решении задач теплопереноса, обладают высокой точностью, однако требуют значительных временных и вычислительных затрат, особенно при многовариантном анализе и оптимизации конструкции [2,3]. В условиях итерационного проектирования это ограничивает возможность оперативной оценки нестационарных тепловых режимов [4]. В связи с этим актуальной является разработка моделей, которые, сохраняя адекватность физике теплопереноса, позволяют существенно упростить анализ динамического распределения теплового поля. Феноменологическая модель чаще всего описывает эмпирическую зависимость от явлений друг к другу, таким образом, что согласуется с фундаментальной теорией теплопереноса. Разрабатываемая модель отображает в основном наблюдаемые свойства объектов и не затрагивает их внутренние глубинные механизмы. Далее рассматриваются нестационарные переходы из одного состояния в другое без детального рассмотрения глубинного механизма этих переходов. Использование такой модели позволяет оптимизировать конструкцию и режимы работы усилителя с учётом динамики протекающих процессов без дополнительных временных и вычислительных затрат.

## II. УСЛОВИЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ

При анализе переходных процессов обычно используются известные краевые условия, такие как параметры окружающей среды или установившегося режима. Для задания граничных условий использована топологическая модель конструктива передающего тракта, которая является основой имитационной модели распределения теплового поля, полученная ранее при построении стационарной тепловой модели. В рассматриваемой модели аналогично задаются открытые граничные условия второго рода с возможностью стационарного, ламинарного и турбулентного видов внутреннего теплообмена. В качестве начальных значений инициализации установлены такие же начальные условия, как у предварительно полученной имитационной модели с установленной начальной сеткой для решения численным методом конечных элементов. Дополнительно заданы условия нестационарного нагрева с возможностью задания функции изменения мощности источника. Далее используется такой же информационный параметр оценки нагрева электронного компонента – температура перехода электронных компонентов.

На основании проведённого анализа построена топологическая модель конструктива усилителя, в котором основными источниками повышенной рассеиваемой мощности являются микросхемы усилителей ASL4046 и ASL4047. Проведено упрощение первоначальной топологической модели с целью уменьшения количества конечных элементов за счёт удаления мелких твердотельных элементов, не оказывающих значительно вклада в общий процесс теплопереноса.

Анализ переходных процессов разогрева обычно связан с изменением краевых условий теплообмена, такие изменения можно устанавливать с введением специальных атрибутов переходных процессов. В полученной модели атрибуты переходных процессов устанавливаются как прикреплённые свойства топологических моделей компонентов для учёта изменения температуры твёрдого тела (кондуктивный теплообмен) и окружающей среды (конвективный теплообмен) со временем. Использование целевых показателей является основополагающим принципом для анализа переходных процессов, поскольку именно с их помощью можно наблюдать, каким образом значения переменных изменяются со временем. Значения целевой величины рассчитываются в конце каждого временного шага и используются для построения кривых зависимости значений переменных от времени. В получаемой модели возможно использовать атрибуты переходных процессов для изменения тепловых параметров, таких как рассеиваемая мощность или температура окружающей среды в течение периода анализа переходных процессов.

В качестве глобальной цели установлены сходимости по средним значениям давления, скорости и температуре воздушных потоков, а также температуры твёрдых тел. В дополнение к глобальным целям активированы цели в таблицах свойств для мониторинга значений, представляющих основной интерес: средние и максимальные значения температуры компонентов, объёмных потоков и давления конвективного переноса вокруг элементов конструкции. Созданы точечные цели для мониторинга температуры корпусов и кристаллов микросхем усилителя и отдельных элементов конструкции для установления динамики распространения теплового поля.

Значения целевых функций рассчитываются в конце каждого временного шага. В полученной модели временные шаги могут быть определены для всего переходного периода или весь переходный период времени может быть разделён на временные интервалы и временные шаги определены в этих временных интервалах. Это сделано для того, чтобы задавать небольшие временные шаги в начале переходного процесса и более длинные временные шаги в конце переходного процесса. Для этого подходит возрастающее линейно или логарифмическое распределение модельного времени. По умолчанию временная область модели содержит равномерные временные интервалы. В разрабатываемой модели использованы равномерные распределения временных шагов для более тщательного отслеживания изменений, вызванных применяемым профилем переходных процессов. Таким образом, можно вручную определять небольшие временные шаги при значительных изменениях протекающих процессах и относительно большие шаги, когда вероятность качественных изменений мала. Временная сетка модели также определяет, когда можно сохранять промежуточные решения.

Модель теплопереноса всей топологии конструкции включает в себя теплопроводность и внешнюю конвекцию с учётом переходных тепловых процессов. При необходимости влияние любого из механизмов теплопереноса можно уменьшить или отключить для учёта специфических условий эксплуатации (например, условия космического пространства). Общее время разогрева при моделировании текущей конструкции первоначально задано 1000 секунд.

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования разогрева модуля усилителя показывают, что время достижения стационарного режима его компонентами составляет около 400-450 с (рис. 1). После этого температура практически не изменяется, если подаваемая мощность остаётся прежней. В дальнейшем температура компонентов практически находится в допустимых пределах при выходе на стационарный режим (рис. 2). При моделировании нестационарного нагрева установлено, что возникающие тепловые градиенты не превышают критических значений для корпусов и кристаллов микросхемы передающего тракта ASL 4047 (рис.3).

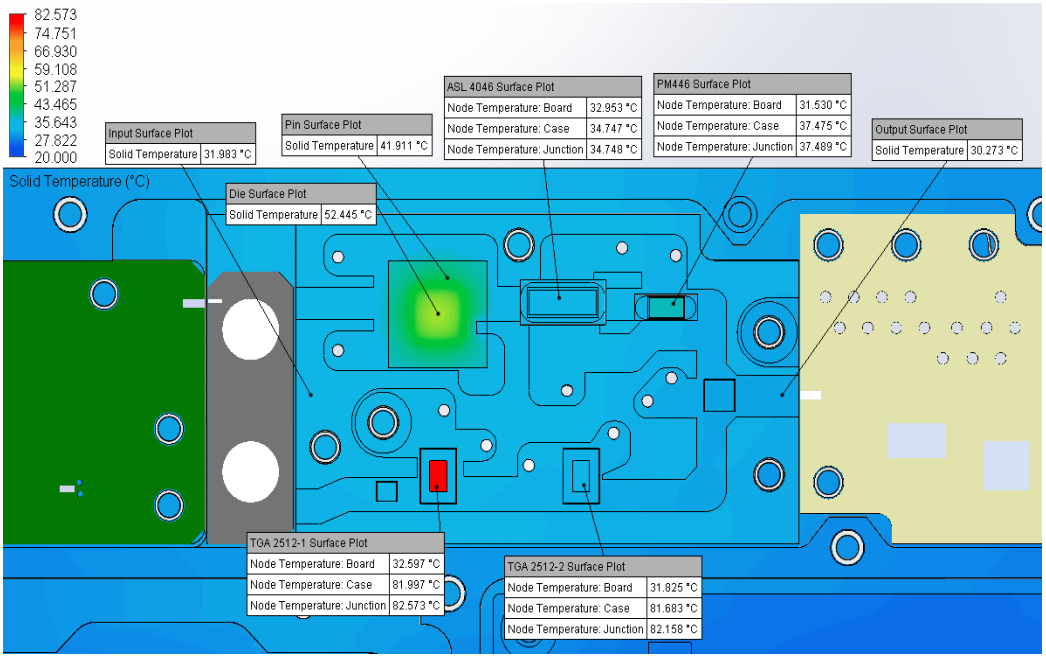



Рисунок 1. Температурные профили компонентов усилителя

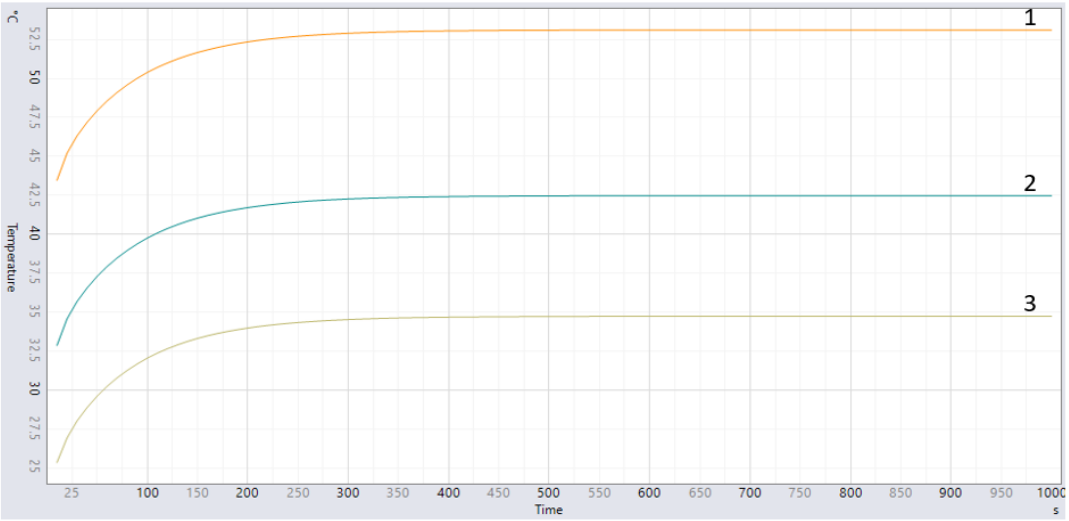
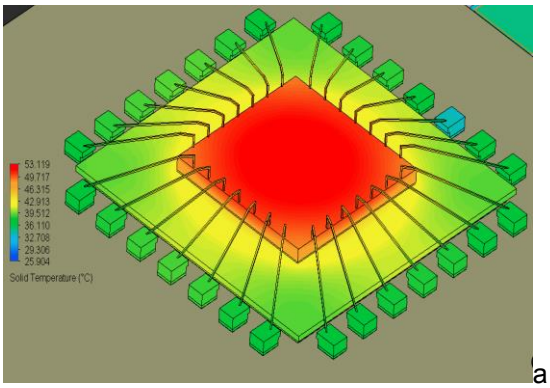
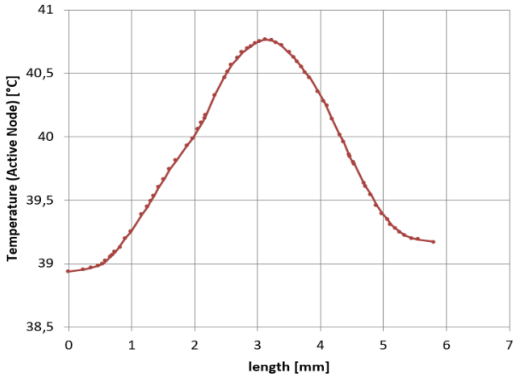



Рисунок 2. Динамика изменения максимальной температуры микросхем усилителя

*1* – кристалл ASL 4047; *2* – корпус кристалла ASL 4047; *3* – кристалл ASL 4046




а




б

Рисунок 3. Распределение *(а)* и градиенты температуры *(б)* при нестационарном разогреве микросхемы ASL4047

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, используя численное моделирование, можно оценить динамическое распределение теплового поля платы усилителя. При этом характер роста температуры отдельных компонентов, в целом, одинаков с разницей в величинах разогрева.

На основании итерационных результатов моделирования возможна оптимизация режимов работы передающего такта и параметров конструкции до её непосредственного изготовления с учётом динамики протекающих процессов без дополнительных временных и вычислительных затрат.

ЛИТЕРАТУРА

[1] S. Gurung and S. Prasad Electro-Thermal Behavior of AlGaN/GaN HEMTs on SiC, Si, Sapphire and Diamond Substrates / 2026 IEEE International Conference for Convergence in Computing Technology (I3CTCON), Lonavala, 2026, pp.1-7

[2] O.T. Kristensen, T. M. J. Nilsson, A. Divinyi, J. Bremer and M. Thorsell Characterization and Modeling of Dynamic Thermal Coupling in GaN MMIC Power Amplifiers / IEEE/MTT-S International Microwave Symposium – IMS 2024, Washington, USA, 2024. – P.1053-1056.

[3] Z.-D. Wang, G.-D. Su and J. Liu A 15-W X-Band Gan MMIC Power Amplifier with Thermal Design / IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Tianjin, China, 2025, pp. 1-3. – P.73-91.

[4] K.R. Bagnall and E.N. Wang Theory of Thermal Time Constants in GaN High-Electron-Mobility Transistors // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – vol. 8, no. 4. – P 606-620.

## PHENOMENOLOGICAL MODEL OF THE DYNAMIC DISTRIBUTION OF THE HEAT FIELD IN AN X-BAND AMPLIFIER

V. Zhuravliov, N. Naumovich, I. Stezhko, V. Kolbun

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus, vadzh@bsuir.by

Abstract: the phenomenological model of transient heating with a variable power function for the power source of a high-power X-band amplifier based on a topological model of the circuit and a steady-state thermal model with initial and boundary conditions specified has been implemented. Target parameters and time step settings for monitoring component temperatures have been determined. It is shown that the time required for the components to reach steady state is 400–450 s, and the thermal gradients do not exceed critical values. The model allows to predict component heating and optimize operating modes and the design of the transmission path without additional time and computational resources.

Keywords: X-band amplifier; thermal field; phenomenological model; transient heat transfer; thermal optimization; temperature gradient.