

*І.М. БОНДАРЕНКО, д-р фіз.-мат. наук, О.С. ГНАТЕНКО, канд. фіз.-мат. наук,
О.В. ГРИЦУНОВ, д-р фіз.-мат. наук, О.Г. ПАЩЕНКО, канд. фіз.-мат. наук,
В.П. КАРНАУШЕНКО, М.А. КОПОТЬ*

АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ TULIRGM ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ ВАКУУМНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ І ГЕНЕРАТОРІВ НВЧ-ДІАПАЗОНУ

Вступ

В наш час різноманітні за класом безпілотні літальні апарати (БПЛА) [1] становлять значну загрозу безпеці суспільства. Заходи протидії їм постійно розроблюються та впроваджуються, але на сьогодні ситуація далека від ідеальної. В той час як великі БПЛА (з розмірами, порівнянними з пілотованими літаками) за принципами їх виявлення і засобами протидії (насамперед, це засоби ППО) непринципово відрізняються від традиційних літальних апаратів, малі БПЛА створюють значні труднощі для протидії їм. Ці БПЛА характеризуються мізерною ефективною площею розсіювання (ЕПР) радіохвиль, в першу чергу через невеликі розміри та широке застосування в їх конструкції пластмас. Вони також мають незначні теплову, акустичну та оптичну сигнатури. Внаслідок невеликої маси їм притаманна висока маневреність, що дає змогу за необхідності виходити з-під прицілу відносно масивної ракети ППО. Одночасна кількість їх у «рої» також може бути доволі значною.

Навіть у разі розв'язання проблеми виявлення, питання ураження чи протидії малим БПЛА стоїть дуже гостро. Вартість зенітної ракети в кілька разів (іноді в десятки разів) перевищує вартість БПЛА, що вражається, а засоби наведення та конструкції підричників не розраховані на відпрацювання малорозмірних і низькошвидкісних цілей. Застосування тактики «рою» (коли об'єкт, що охороняється, або сам комплекс ППО атакують одночасно безліч БПЛА з одного або різних напрямків) призводить до виснаження боєзапасу та прориву принаймні частини БПЛА до об'єкта атаки. Інша проблема – використання низьковисотного профілю польоту: у цьому випадку радіогоризонт визначає дальність виявлення цілі. Як і для будь-якої цілі ППО, для протидії БПЛА потрібно їх виявити та знищити фізично та/або вивести з ладу їхні канали управління, навігації, спостереження чи функціонування [2]. Основними нерадіотехнічними засобами придушення та знищення БПЛА є:

- кінетичне ураження уламками зенітного снаряда чи зенітної ракети;
- перехоплення БПЛА задалегідь поставленими механічними перепонами (сітками) або дроном-винищувачем;
- пошкодження чи руйнування корпусу інтенсивним лазерним випромінюванням.

До радіотехнічних методів відносяться:

- постановка зависи радіоелектронних завад;
- перевантаження нелінійних електронних кіл постійним мікрохвильовим випромінюванням достатньої потужності;
- невідновне ураження електроніки БПЛА короткими електромагнітними імпульсами потужного НВЧ генератора [3, 4].

Кожен з перелічених методів має свої переваги, недоліки та типову тактику застосування. Радіотехнічні засоби можна класифікувати з точки зору потужності кінцевих каскадів відповідного радіоелектронного обладнання. Для створення зависи радіоелектронних завад ця потужність вимірюється ватами (в безперервному режимі). Для неруйнуючого перевантаження вхідних кіл приймачів БПЛА – кіловатами (також в безперервному режимі). Необоротну деградацію напівпровідникових приладів БПЛА на тактично прийнятній відстані можна викликати лише електромагнітними імпульсами з піковою потужністю порядку мегават і більше. Розвиваючи доробок однієї з відомих наукових шкіл Харкова, подальші зусилля сконцентруємо на дослідженні методів комп'ютерного аналізу, проектування та оптимізації сучасних НВЧ приладів, призначених для формування саме таких імпульсів.

Огляд сучасного стану наукової проблеми

До найбільш відомих джерел потужного НВЧ випромінювання на сьогодні відносяться [5]:

- підсилювачі та генератори з поздовжньою взаємодією (прилади О-типу): багаторезонаторні пролітні клістри, лампи біжучої хвилі (ЛБХ) О-типу тощо;
- генератори й підсилювачі зі схрещеними полями (прилади М-типу): магнетрони (в тому числі релятивістські), амплітрони, ЛБХ М-типу та ін.;
- мазери на циклотронному резонансі (гірорезонансні прилади): гіротрони.

Наразі, як і раніше, неможливо однозначно віддати перевагу якомусь з зазначених типів приладів з точки зору застосування їх для ураження БПЛА. Гіротронам та пролітним клістрам властиві найбільші досягнуті на цей час потужності, але їхні конструкції більше орієнтовані на використання в стаціонарних умовах, ніж на базі автомобільного транспорту. ЛБХ О- та М-типів притаманна широкосмуговість, що дає змогу більш гнучко керувати тривалістю та формою робочих імпульсів. Однак потужності цих підсилювачів далеко не максимальні. Нарешті, прилади М-типу не є рекордними, з точки зору жодних електромагнітних параметрів і характеристик, але натомість мають унікальні конструктивні особливості: граничну простоту конструкції, ударо- та вібростійкість, мінімальну масу в поєднанні з порівняно низькими робочими напругами. Це робить магнетронні прилади практично ідеальними для застосування в польових умовах.

В цілому, крім військових використань, існує постійний інтерес до створення потужних, високоефективних джерел мікрохвильового випромінювання, що працюють у гігагерцовому, терагерцовому та субтерагерцовому (аж до інфрачервоного) діапазонах частот [6]. Такі джерела необхідні для низки важливих технічних та наукових застосувань, зокрема:

- нагрівання та діагностики плазми в новому поколінні установок для керованого термоядерного синтезу;
- прискорення елементарних часток;
- терагерцової спектроскопії та магнітометрії;
- експериментальних досліджень та контролю різних середовищ, включаючи біологічні;
- використання потужних імпульсів субтерагерцового випромінювання як ондуляторів для короткохвильових лазерів на вільних електронах. Є також численні застосування потужних НВЧ приладів у фізиці плазми (наприклад, створення інтенсивних джерел ультрафіолетового випромінювання на основі терагерцового розряду), космічному зв'язку тощо.

Існує перспективна ідея повторення вражаючого успіху в покращенні конструкцій ЛБХ та пролітних клістрів у 1970–80-х роках. Тоді вдалося різко підвищити ефективність цих приладів, надавши тим самим перевагу їм над магнетронами. Поздовжня оптимізація процесу взаємодії хвилі з електронним потоком була головним «секретом» такого прогресу.

На відміну від 1970–80-х років, зараз саме комп'ютерні експерименти повинні відігравати ключову роль у подібній оптимізації. Тому потрібні відповідні математичні інструменти, як для електродинамічного («холодного»), так і для електронного («гарячого») моделювання НВЧ приладів. Загалом, під цим розуміються розрахунки довільних нестационарних немонохроматичних полів у дисперсійних тривимірних (3D) електродинамічних системах (електродинамічних лініях) без електронних потоків або з ними відповідно (наприклад, періодичних сповільнюючих структурах для ЛБХ, клістрів та приладів М-типу, гладкостінних хвилеводів для пристроїв швидкої хвилі тощо).

Перспективні розробки, розпочаті у 1970-х роки відомою науковою школою Харкова за ініціативи професора О.Г. Шеїна, включали, зокрема, повноформатне та 3D PIC [7] моделювання приладів зі схрещеними полями [8]. В результаті одним з авторів цієї статті був написаний двовимірний (2D) повноформатний нестационарний PIC код TULIPgm (TUBE modeLING Program) [9]. Спочатку він був призначений для моделювання нестационарних явищ у підсилювачах зворотної хвилі М-типу з розподіленою емісією та замкнутим електронним потоком (амплітронах). Однак через значні переваги нового на той час повноформатного підходу над

популярним тоді наближенням «рухомого вікна», код розвивався далі. Було додано модель автогенератора зі схрещеними полями (магнетрона), на черзі була реалізація моделей дематрона та ЛББХ М-типу. Можливості, які дає одночасне моделювання всього внутрішнього простору НВЧ приладу, дозволяють аналізувати нові практично значимі явища в НВЧ генераторах та підсилювачах і підвищують точність модельної оцінки їхніх технічних параметрів. За допомогою системи TULIPgm проводилися різноманітні дослідження явищ у схрещених полях, а також розрахунки параметрів і характеристик реальних магнетронних приладів.

Серед цих досліджень можна згадати пошук способів підвищення коефіцієнта підсилення амплітронів з катодним збудженням [10]. Добре відоме тепер вторинно-емісійне групування потоку електронів у схрещених полях поблизу поверхні розподіленого катоду [11] було відкрито в 1984 р. за допомогою вказаного вище коду. На жаль, через низьку роздільну здатність символьних принтерів, спочатку воно помилково інтерпретувалося як зародження солітонів. Пізніше спостерігалися також інші види нестійкості електронної хмари: власні коливання замкнутого потоку, істинні солітони та конвективні явища у втулці та спицях [11]. Досліджено особливості конкуренції нормальних мод сповільнюючої системи в амплітронах і магнетронах. Тривимірне повноформатне моделювання приладів М-типу також було реалізовано, але на той час (1990-ті роки) основні зусилля вже були зосереджені на реалізації в коді TULIPgm так званих спектральних моделей.

Спектральний підхід [12, 13] полягає в урахуванні всіх суттєвих часових гармонік процесу взаємодії полів і часток у частотному континуумі та отриманні в результаті моделювання реальних частотних характеристик приладу. Спектральний метод реалізується непрямым шляхом, тобто, у часовій області. Спектр вхідного сигналу пристрою перетворюється на спектр вихідного сигналу за допомогою двох перетворень Фур'є, розділених нестационарним моделюванням поширення негармонійної електромагнітної хвилі через електродинамічну систему з урахуванням нелінійної взаємодії з електронним потоком. Отримані частотні розподіли представляють у графічній формі та відображають на моніторі комп'ютера, як на звичайному аналізаторі спектру.

Метою статті є аналіз архітектури та можливостей спеціалізованої програмної системи (пакета прикладних програм) TULIPgm, призначеної для розрахунків та оптимізації параметрів і характеристик потужних вакуумних НВЧ приладів, що можуть бути використані в системах протидії малим та середнім безпілотним літальним апаратам, а також в інших застосуваннях, де потрібна генерація електромагнітних НВЧ імпульсів великої інтенсивності.

Архітектура програмної системи

Незважаючи на значну кількість наявних спеціалізованих програм, розроблених протягом минулих десятиліть відомими науковими колективами відповідного профілю за замовленнями провідних радіоелектронних, авіакосмічних, військово-морських та інших корпорацій (Raytheon, Northrop Grumman, Lockheed Martin, NRL, MIT тощо), а також більш або менш універсальних комерційних програм, що реалізують так звані «Particle-in-Cell» (PIC) алгоритми [7] (наприклад, Magic, Magic3D, COMSOL Multiphysics тощо), потреба в аналогічних вітчизняних програмних системах залишається актуальною. При цьому серед їхніх найважливіших характеристик слід зазначити конкретні алгоритми, що застосовуються для розрахунку електромагнітних полів в об'ємі НВЧ приладу (алгоритми для моделювання часток розрізняються лише деталями). Методи скінченних різниць та скінченних елементів у часовій області (FDTD та FETD відповідно) [14, 15] є універсальними та найбільш придатними для цієї мети, але вони занадто ресурсоємні, особливо для приладів зі складними внутрішніми границями. Враховуючи, що електронний потік займає лише невелику частину загального внутрішнього об'єму пристрою, у таких випадках може бути ефективним метод розділення змінних (Фур'є). Розділення змінних зменшує обсяг обчислень, оскільки ресурсоємні базові цикли електродинамічного («холодного») моделювання використовуються лише для одно-

прохідного розрахунку власних функцій електродинамічної системи, які потім зберігаються в просторових межах електронного потоку.

На жаль, класичний метод розділення змінних погано адаптовано для відкритих або/та узгоджених електродинамічних систем, оскільки вони мають континуальні спектри власних функцій. Нещодавно запропоновано перспективну модифікацію метода Фур'є, де континуальний набір власних функцій відкритих або узгоджених електродинамічних систем замінюється скінченною дискретною множиною нових просторово локалізованих функцій: так званих парціальних мод електродинамічної системи або осцилетів (*oscillets*) [16]. Цей підхід також може спростити моделювання НВЧ приладів з нерегулярними вздовж напрямку групової швидкості хвилі сповільнюючими системами. Саме вказані вище перспективні алгоритми реалізовано в програмній системі TULIPgm, яку, таким чином, можна вважати чисельно-аналітичною (на відміну від повністю чисельних універсальних комерційних програм, про які згадувалося вище). Розглянемо спершу особливості її архітектури.

Структура програми. Програмну структуру системи TULIPgm визначено на двох рівнях: логічному та фізичному. Перший описує алгоритми, структури даних і логіку взаємодії частин системи. Фізичний рівень стосується програмної реалізації та подальшого використання логічних частин системи. Логічний рівень поділяється на два підрівні: програмні об'єкти та логічні програмні модулі. Кожен підрівень пов'язано з певним етапом розробки програмного забезпечення.

Програмні об'єкти – це елементи мови програмування, які описують дані (інформаційні об'єкти: змінні, масиви, структури тощо) або процедури (процедурні об'єкти: підпрограми, функції). Вони важливі на етапі структурного проектування системи. Логічні програмні модулі (ЛПМ) – це сукупності програмних об'єктів, які доцільно програмувати або використовувати спільно. Вони з'являються на етапі реалізації програмного забезпечення.

Повний набір логічних модулів системи TULIPgm розділено на підмножину модулів обслуговування й моніторингу системи (так званий Диспетчер) і кілька підмножин модулів власне моделювання, які називаються Задачами (*Problems*, українською з великої літери). Кожна Задача призначена для моделювання певного НВЧ приладу (наприклад, магнетрона) або групи з кількох конструктивно подібних приладів.

На фізичному рівні кожен логічний модуль може бути реалізований у кількох варіантах (так звані фізичні програмні модулі, ФПМ). Відмінність варіантів модуля полягає в різній реалізації одних і тих самих програмних об'єктів. Це може стосуватися особливостей приладу (наприклад, прямокутна або циліндрична геометрія), або особливостей моделі (2D або 3D). По суті, зміни варіантів модулів не впливають на логічну структуру системи, оскільки інтерфейси всіх варіантів ФПМ, що реалізують той самий ЛПМ, є аналогічними.

З іншого боку, оскільки надто універсальна логічна структура Задачі може виявитися дуже розгалуженою та заплутаною, замість неї розробляються кілька так званих конфігурацій тієї самої Задачі з різними логічними структурами, які позначаються шістнадцятковими номерами від 00 до FF. Існує кілька моделюючих конфігурацій кожної Задачі (з номерами 00...0F), які реалізують основні алгоритми РІС моделювання НВЧ приладу. Допоміжні конфігурації (10...7F) виконують вторинні розрахункові процедури. Нарешті, сервісні конфігурації (80...FF) реалізують обслуговуючі функції, наприклад, підготовку вхідних даних або діагностику результатів моделювання.

Коли всі фізичні модулі розроблено, необхідно виконати їх компонування та запуск. Залежно від можливостей операційної системи (ОС) розрізняють динамічне та статичне збирання програмної системи. Перше полягає в початковому завантаженні в оперативну пам'ять і виконанні лише ФПМ Диспетчера. ФПМ Задачі вибираються та завантажуються пізніше, засобами Диспетчера. При статичному збиранні фізичні модулі Диспетчера та Задачі завантажуються в оперативну пам'ять лише засобами ОС (одночасно).

Обчислювальний процес. Обчислювальний процес у системі TULIPgm також розглядається на двох рівнях. Логічний рівень описує потік моделювання незалежно від реальних запусків програми на виконання. Фізичний стосується фактичних пусків та зупинок системи. Розділення рівнів забезпечується механізмом контрольних точок (Checkpoints).

З логічної точки зору обчислювальний процес складається із «сесій» (Sessions), які не пов'язані одна з одною даними. Кожна сесія починається з «холодного запуску» системи, під час якого очищуються так звані файли зв'язку завдань (Job link files, JLF). Це відповідає початку моделювання нового приладу. Сесія розділена на «завдання» (Jobs), які пов'язані між собою даними за допомогою JLF. Вхідні та вихідні параметри приладу поступово накопичуються в JLF. Це забезпечує безперервність процесу моделювання. Наприклад, після завдань, які виконують «холодні» обчислення пристрою (визначення напруги Хартрі, узгодження входу і виходу електродинамічної системи [17] тощо), завдання «гарячого» моделювання цього ж приладу можуть виконуватися без повторного введення вхідних параметрів. Якщо має місце динамічне збирання системи, модулі потрібної Задачі завантажуються в ОП під час ініціалізації завдання та вивантажуються з неї після його завершення.

Кожне завдання складається з «задач» (Tasks, українською з малої літери, на відміну від Problems). Їх метою є багаторазове повторення однієї й тієї ж процедури моделювання з різними вхідними даними. Це є основою для подальшого впровадження алгоритмів оптимізації НВЧ приладів. Наразі задачі використовуються лише для повторного моделювання того самого приладу з його «холодного» стану. Задачі поділяються на кроки задачі (Task steps). Завдяки циклічним, в основі, алгоритмам моделювання НВЧ приладів, вони дозволяють керувати основним циклом нестационарного або ітераційного розрахунку.

На фізичному рівні обчислювальний процес складається з «прогонів» (Runs). Це реальні запуски виконуваної програми, яка містить лише Диспетчер або Диспетчер і Задачу разом.

Оскільки логічний і фізичний рівні, як правило, не узгоджуються (наприклад, кілька коротких завдань можуть бути виконані під час одного прогону при динамічній збірці системи, тоді як довгий розрахунок може бути завершений лише протягом кількох прогонів), важливо забезпечити безперервність логічної структури обчислювального процесу. Це гарантується механізмом контрольних точок. Під час запису контрольних точок модулі Диспетчера й Задачі зберігають усю інформацію, що визначає поточний стан програмної системи, у так званих файлах контрольних точок (Checkpoint files, CPF). При наступному прогоні завантажені в ОП «порожні» (тобто без даних) фізичні модулі можуть зчитувати ці дані, забезпечуючи точно відновлений стан системи на момент запису відповідної контрольної точки.

Події та їх обробка. У логічній структурі обчислювального процесу є кілька місць, де необхідна одночасна активація багатьох ЛПМ системи. Це, наприклад, початок завдання або початок прогону, коли модулями повинні бути введені відповідно вхідні дані чи дані з CPF. На початку задачі потрібно один раз розрахувати певні коефіцієнти, щоб не перераховувати їх на кожному кроці задачі. Ще одна причина – запис контрольної точки. Вставка відразу багатьох викликів ЛПМ у відповідні точки алгоритму затьмарює його суть і вимагає змін після кожної зміни списку модулів. У цьому випадку більше підходить так званий механізм подій.

«Подією» (Event) в системі TULIPgm є переривання послідовного виконання алгоритму моделювання з почерговою передачею управління всім завантаженим в оперативну пам'ять ЛПМ. Існує дескриптор типу («розташування») події Event_Type (наприклад, "RunBegin", "RunEnd", "JobBegin", "JobEnd", "ChkPoint") і два модифікатори типу: Event_TypeM1 і Event_TypeM2, які детальніше описують умови виникнення події (наприклад, це запис чи зчитування контрольної точки). Збудження події (Event raise) полягає у виклику спеціальної підсистеми Диспетчера, яка містить списки ЛПМ Диспетчера і завантаженої Задачі і забезпечує передачу управління цим модулям.

Оскільки порядок активації ЛПМ не визначено заздалегідь, для забезпечення інформаційного зв'язку між модулями при обробці події ця подія розбивається на кілька рівнів

```

Module LocField_I00
  Real :: LocField_Ey
  Real :: LocField_Ez
  Interface
    Subroutine LocField_Electric ( Y, Z )
      Real :: Y, Z
    End subroutine LocField_Electric
  End interface
End module LocField_I00

```

Рис. 1. Інтерфейс модуля (файл LocField_I00.f90)

ний рівень обробки Event_MaxLev.

ЛПМ містять спеціальні процедури EventProc, які складаються з кількох так званих блоків обробки подій (Event processing blocks, EPB). Кожен EPB обробляє лише один тип і один рівень події. Інші типи або рівні при цьому ігноруються. Якщо модуль не містить відповідного EPB, його процедура EventProc відпрацьовує «вхолосту» на поточному типі та рівні події.

На жаль, при такому розподілі обробки подій з'являється новий тип «зчеплення» ЛПМ [18], який можна назвати «зчепленням за рівнем події». Його небажані наслідки можна зменшити шляхом ретельного планування глобальних (тобто загальносистемних) графіків обробки подій.

Таким чином, події в системі TULIPgm багато в чому подібні до механізму програмних переривань більшості з відомих архітектур комп'ютерів [19]. Новою є лише багаторівнева обробка подій з відповідним забезпеченням зв'язку ЛПМ за даними (інформаційними об'єктами). Замість активації довгих списків ЛПМ у певних точках алгоритму, в них розміщуються лише оператори збудження події. Модулі самостійно здійснюють обробку цих подій. Якщо список модулів змінюється (наприклад, після зміни Задачі), це впливає лише на підсистему обробки подій, а не на весь код програми.

Організація модулів. ЛПМ системи TULIPgm складається з двох частин: інтерфейсу модуля та реалізації модуля. Це ілюструють рис. 1 і 2, де показано демонстраційний модуль LocField з варіантом 00. Інтерфейсною частиною є модуль Fortran 90 LocField_I00, який включає експортовані програмні об'єкти (дані LocField_Ey, LocField_Ez та інтерфейс підпрограми LocField_Electric). Множина експортованих усіма модулями інформаційних об'єктів утворює єдину глобальну структуру даних – інформаційну основу програмної системи, на якій виконуються ті чи інші сценарії моделювання. Реалізуючою

Event_Level (0, 1, 2, ...). На кожному рівні всі завантажені модулі знову активуються по черзі. Якщо під час обробки події модуль 1 розраховує інформаційний об'єкт А, а модуль 2 обчислює інформаційний об'єкт В, використовуючи значення А, розрахунок А повинен бути розміщений на рівні n , а обчислення В – на рівні $n+1$ або більше. Крім того, модуль 1 потім може розрахувати інформаційний об'єкт С за допомогою значення В, якщо це зробити на рівні $n+2$ або більше і т.д. Для кожного типу події Event_Type визначено максималь-

```

Module LocField_R00
  Real :: CoeffY, CoeffZ
  Contains
    Real function Interpol ( Coord, Coeff )
      Real :: Coord, Coeff
      Interpol = Coord * Coeff / 2.87
    End function Interpol
  End module LocField_R00

  Recursive subroutine LocField_EventProc
    Use Event_I00
    Use LocField_I00
    Use LocField_R00
    If ( Event_Type.eq."JobBegin" .and. Event_Level.eq.05 )
    then
      CoeffY = 3.62 ! EPB JobBegin_05
      CoeffZ = 4.12
    End if
  End subroutine LocField_EventProc

  Subroutine LocField_Electric ( Y, Z )
    Use LocField_I00
    Use LocField_R00
    Real :: Y, Z
    LocField_Ey = Interpol ( Coord=Y, Coeff=CoeffY )
    LocField_Ez = Interpol ( Coord=Z, Coeff=CoeffZ )
  End subroutine LocField_Electric

```

Рис. 2. Реалізація модуля (файл LocField_R00.f90)

```

.....
Use LocField_I00
.....
Call LocField_Electric ( Y=ParticleY, Z=ParticleZ )
SumEy = SumEy + LocField_Ey
SumEz = SumEz + LocField_Ez
.....

```

Рис. 3. Використання модуля (OtherFile_R00.f90)

частиною є сукупність кількох елементів:

- модуля Fortran 90 LocField_R00, який містить приватні (не експортовані з LocField) інформаційні та процедурні об'єкти (дані CoeffY, CoeffZ і функція Interpol);
- рекурсивної процедури обробки подій LocField_EventProc;
- однієї або кількох експортованих процедур (функцій), таких як LocField_Electric.

Елемент LocField_R00 пов'язує всі інші зазначені вище елементи. Оскільки файл LocField_R00.mod не заноситься в каталог системних модулів під час компіляції реалізації ЛПМ (на відміну від LocField_I00.mod під час компіляції інтерфейсу), він є недоступним з інших модулів. Підпрограму LocField_EventProc не описано в інтерфейсній частині, оскільки вона викликається спеціальною процедурою на асемблері, а не модулем Fortran 90, як LocField_Electric (рис. 3).

Елементи LocField_I00 і LocField_R00 містять усю інформацію, що описує стан модуля LocField під час його неактивності. Тому їхній вміст записується в CPF і зчитується з них за допомогою процедури EventProc (це не показано на рис. 2).

Модулі TULIPgm розділено на інтерфейсну та реалізуючу частини, оскільки Fortran 90 не підтримує важливу функцію мови Ада [20], а саме, окрему компіляцію інтерфейсу модуля та його тіла. За її відсутності будь-яка незначна переробка в реалізації модуля може призвести до «ланцюгової реакції» повторної компіляції викликаючих модулів. Крім того, це звільняє шлях до перехресного використання модулів, якщо це бажано. Також це причина, чому експортовані процедури (такі, як LocField_Electric) не розміщуються в модулях Fortran 90.

Збирання системи. Збирання системи TULIPgm з модулів (як динамічне, так і статичне) виконується в два етапи. По-перше, це вибір Задачі разом із її конфігурацією, тобто вибір списку ЛПМ для виконання. На цьому етапі визначається логічна структура програми. Другий етап – підбір варіантів модулів, тобто складання набору ФПМ. Після визначення таким чином фізичної структури системи, Задача або вся система завантажується в оперативну пам'ять і виконується.

Розглянемо детальніше динамічне збирання системи, як більш досконале. Коли попереднє завдання завершено, а наступне ще не розпочато, в оперативній пам'яті знаходиться лише Диспетчер, а не модулі Задачі. Назва потрібної Задачі (наприклад, CFD) і конфігурація (наприклад, 02) вводяться користувачем під час ініціювання нового завдання. Вони дозволяють Диспетчеру вибрати необхідний список логічних модулів (CFD_02.tbl) з-поміж попередньо визначених для різних Задач та їх конфігурацій.

Кожен логічний модуль має так званий дескриптор суфіксу, який являє собою ланцюжок з восьми двійкових ключів збірки (Assembling keys). Ключі однозначно визначають усі структури даних і особливості алгоритмів модуля. Варіант ЛПМ, тобто суфікс відповідного фізичного модуля, записується як двозначний шістнадцятковий еквівалент восьмизначного двійкового числа, яке утворюється конкретними значеннями ключів збірки.

Чотири старші біти дескриптора суфіксу є так званими «сильними» ключами. Вони впливають як на інтерфейсну, так і на реалізуючу частини відповідного модуля. Чотири молодші біти є «слабкими» ключами, які визначають лише особливості реалізації модуля. Кожна задача має свій набір ключів збірки. Додаток містить список ключів, які стосуються Задачі CFD (див. далі).

Припустимо, що логічний модуль LocField може бути реалізований у восьми варіантах:

- для 2D і 3D моделей;
- прямокутної і циліндричної геометрії приладу;
- приладів біжучої та стоячої хвилі. Нехай інтерфейсна частина модуля залежить лише від розмірності моделі, а реалізація ЛПМ визначається всіма перерахованими варіантами.

У результаті дескриптор суфіксу модуля може бути написаний, наприклад, як

NullKey NullKey NullKey TwoDims NullKey NullKey RectAng StaWave ,

де NullKey – «порожній» ключ, який завжди дорівнює нулю.

Зрозуміло, що фізичний модуль, який реалізовуватиме логічний модуль LocField для 3D моделі циліндричного приладу біжучої хвилі, матиме двійковий суфікс 00000000 (тобто шістнадцятковий 00). Суфікс модуля, що реалізує 2D модель прямокутного приладу стоячої хвилі, – 00010011 (або 13 відповідно) і т.д. Назви інтерфейсних частин модулів – LocField_I00 і LocField_I10; імена реалізуючих частин – LocField_R00 і LocField_R13 відповідно. Зрозуміло, що в загальному випадку кількість варіантів реалізації модуля може бути більшою, ніж кількість варіантів його інтерфейсу.

Алгоритм підбору варіантів модулів Задачі досить очевидний, якщо врахувати, що для всіх модулів системи існує список логічних суфіксів дескрипторів SuffDesc.tbl. Після введення користувачем значень ключів збірки Диспетчер генерує набір необхідних фізичних модулів (як інтерфейсних частин, так і реалізацій), які завантажуються в ОП.

Статичне збирання системи відрізняється від описаного вище динамічного тим, що список усіх фізичних модулів визначається перед запуском Диспетчера (оскільки в оперативну пам'ять модулі Задачі завантажуються одночасно з модулями Диспетчера). Тому неможливо змінити назву та конфігурацію Задачі, а також значення ключів збірки під час прогону.

Алгоритми програмної системи

Сьогодні в систему TULIPgm включено три Задачі, які називаються «CFD», «Cyclam» і «Magnol». Задача CFD (Crossed-Field Device) є універсальною, яка використовує кілька ключів збірки (див. Додаток) і дозволяє моделювати різні прилади зі схрещеними полями. Очевидно, що така модель не може врахувати надто дрібні деталі конструкції приладів, наприклад внутрішні конструкції електронних гармат чи колекторів. Алгоритм цієї Задачі обмежений моделюванням простору взаємодії приладу разом із короткими відрізками зазорів, які розміщені між торцями ламелей сповільнюючої системи та між ними та торцевими екранами (див. рис. 4, де показано лінійний підсилювач зі схрещеними полями змішаного променеворозподілено-емісійного типу). Розробку цієї універсальної Задачі зараз призупинено. Замість неї розроблено дві спрощені Задачі, менш трудомісткі та дорогі. Задачу Cyclam (CYlindrical Closed AMplifier) призначено для 2D моделювання звичайних амплітронів і амплітронів з катодним збудженням, а також підсилювачів з простором дрейфу (SFD). Задача Magnol (MAGNetron Oscillator) дозволяє також двовимірне моделювання звичайних та інвертованих магнетронів.

Алгоритми Задач Cyclam і Magnol досить схожі між собою і є підмножинами процедур

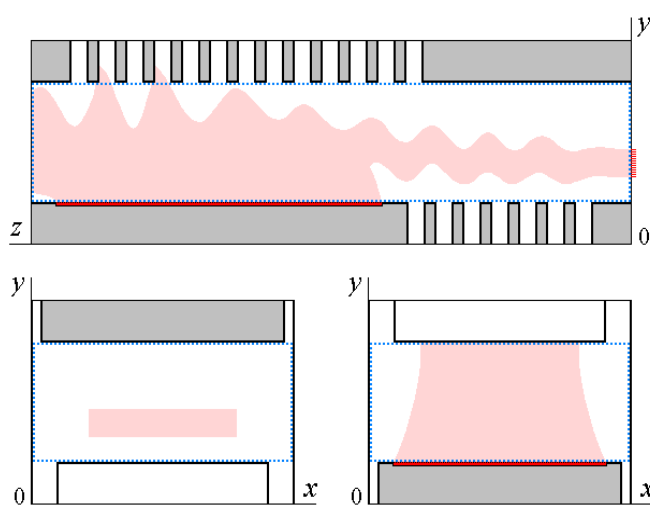


Рис. 4. Приклад геометрії системи, що моделюється

Задачі CFD при певних значеннях ключів збірки. Тому подальший опис стосується модельних конфігурацій усіх трьох Задач. Як це типово для самоузгоджених нестационарних моделей електровакuumних приладів, алгоритми містять циклічні повторення моделювання руху заряджених часток і розрахунку полів.

Динаміка часток. Кінетичне рівняння для електронного потоку розв'язується, як зазвичай, методом часток [7]. Два види моделей відрізняються визначенням значень зарядів часток. Алгоритми з фіксованим зарядом часток використовуються, як правило, за

наявності електронної гармати або термоелектронного катода. Вони розглядають число електронів у частці як постійне в часі й однакове для всіх часток. Моделі зі змінним зарядом часток доречні, якщо присутній лише холодний вторинно-емісійний катод. На першому етапі моделювання кожна частка тут дорівнює одному електрону. Під час перехідного процесу розміри часток багаторазово збільшуються при актах вторинної емісії. Щоб уникнути суттєвої диференціації зарядів, виконується видалення надто малих часток разом з «розщепленням» великих замість збільшення їх зарядів при подальших актах вторинної емісії.

Рівняння руху часток розв'язується за схемою Рунге–Кутта четвертого порядку [21]. Інтерполяція значень полів між точками сітки дискретизації перед підстановкою в праву частину рівняння здійснюється за допомогою чотиривимірного методу PWS (Polynomials with Smoothing) [22]. Використовується інтерполяційний поліном першого порядку

$$\overset{1}{E}(t, x, y, z) = PE_0 + PE_t \cdot (t - t_0) + PE_x \cdot (x - x_0) + PE_y \cdot (y - y_0) + E_z \cdot (z - z_0),$$

де $PE_0, PE_t, PE_x, PE_y, PE_z$ – векторні коефіцієнти поліному; t_0, x_0, y_0, z_0 – координати центру чотиривимірної комірки, в якій перебуває частка.

Вирази для множників PE_0 К PE_z , а також інвертовану форму для розподілу зарядів часток на точки сітки дискретизації наведено в [22]. Екстраполяція координати частки $\overset{1}{r}$ і її швидкості $\overset{1}{v}$ на кінець наступного часового кроку (для передбачення значень полів у цей момент) виконується за формулами:

$$\overset{1}{v}_X = \overset{1}{v}_E + (\overset{1}{v}_E - \overset{1}{v}_B); \quad \overset{1}{r}_X = \overset{1}{r}_E + (\overset{1}{v}_E + \overset{1}{v}_X)\Delta t / 2,$$

де індекс B (Begin) відноситься до початку часового кроку Δt , індекс E (End) – до його кінця, індекс X (eXtrapolated) – до кінця наступного часового кроку. Таким чином, моделюючий алгоритм перетворюється на своєрідний метод прогнозу та корекції. Деяке збільшення обсягу розрахунків цілком компенсується зменшенням шуму моделі за рахунок часової інтерполяції полів.

Флуктуації вихідних параметрів, що залежать від часу, додатково зменшуються шляхом згладжування за допомогою моделі лінійної регресії $f(t) = a_0 + a_1 t$ на інтервалі довжиною до 256 часових кроків. Це забезпечує значно меншу затримку вихідних даних під час перехідного процесу порівняно з усередненням, яке зазвичай використовується в таких випадках.

Одним з незначних, але дуже корисних на практиці нововведень, є автоматичне визначення заряду частки (якщо використовується модель з фіксованим зарядом), що звільняє користувача від виснажливої «підгонки» цього значення. Це здійснюється за допомогою аналітичного прогнозування характеристик майбутньої хмари Бріллюена у приладі.

Потенціальні поля. Потенціальні поля розраховуються як суперпозиція розв'язків рівнянь Лапласа та Пуассона. Перше розв'язується методом SOR з прискоренням Чебишова [7] один раз на початку завдання. В результаті для всіх електродів знаходяться й табулюються одиничні структурні функції електричного поля, які потім множаться на потенціали відповідних електродів у кожен момент часу. Для двократного розв'язування рівняння Пуассона на кожному кроці задачі використовується метод FACR [7] з нульовими граничними умовами на всіх електродах і періодичними або дзеркальними в напрямку дрейфу потоку (залежно від значення ключа ReEntra). Пунктирні лінії на рис. 4 обмежують область, де розв'язується рівняння Пуассона.

Соленоїдні поля. Три конфігурації кожної з зазначених вище Задач розрізняються підходом до розрахунку вихрових полів. Наприклад, в Magnol_00 соленоїдні поля взагалі не враховуються, тобто моделюється магнетронний діод. Конфігурація Magnol_01 реалізує модель другого рівня [12], що означає розрахунок вихрових полів методом комплексних амплітуд [17]. У Magnol_02 використовується модель першого рівня, у якій соленоїдні поля оцінюються методом миттєвих значень [17].

Розв'язання рівняння збудження другого порядку використовується за схемою P(EC)³E Адамса–Бешфорта четвертого порядку [21]. Електродинамічне узгодження входу і виходу сповільнюючої системи виконується з моделюванням реальних опорів зв'язку [17].

Використовується форма Фур'є рівняння збудження першого порядку для StaWave=1 і форма Даламбера для StaWave=0 [16], як більш природні. Друга форма розв'язується за допомогою неявної скінченно-різницевої схеми другого порядку. Кожен високочастотний сигнал в сповільнюючій системі моделюється як суперпозиція основної та додаткової частин. Вони відповідають прямій та зворотній хвилям відповідно (якщо StaWave=0) або двократно виродженим нормальним модам сповільнюючої системи (якщо StaWave=1), крім видів коливань 0_1 і π , де додаткові частини завжди дорівнюють нулю.

Допоміжні процедури. Для підтримки описаних алгоритмів моделювання різними математичними методами до системи TULIPgm включено невеликий «пакет наукових підпрограм». Він містить найкращі чисельні процедури, спеціально відібрані та адаптовані для задач спектрального моделювання (усі наявні у вихідних кодах). Наприклад, в нього входять генератори випадкових чисел з різними законами розподілу, розв'язувачі нелінійних рівнянь, програми швидкого перетворення Фур'є тощо. Особливо слід згадати параметричні процедури для спектрального й гармонійного оцінювання, як «sanctum sanctorum» алгоритмів спектрального моделювання. Існують процедури спектрального аналізу дійсних і комплексних часових рядів за допомогою модифікованого коваріаційного методу [23], а також для гармонійного розкладання в ряди Фур'є за допомогою первинних методів Проні і методів найменших квадратів Проні (включаючи змішаний підхід [24]) та усіх подальших їх покращень.

Системний інтерфейс програми

Існують три фізичні канали для обміну інформацією між системою TULIPgm та зовнішнім середовищем:

- файли JLF та CPF, де використовуються неформатовані (двійкові) дані;
- інтерактивне введення та відображення форматованої (тобто, орієнтованої на користувача) інформації через клавіатуру та монітор відповідно;
- механізм зовнішніх переривань, який не передає жодних даних, але змінює стан програмної системи.

Сучасні алгоритми моделювання потребують досить складних процедур підготовки даних, а також діагностичних процедур (наприклад, при визначенні геометрії приладу, призначенні частотного розподілу вхідних сигналів, аналізі стану електронного потоку, візуалізації спектрів вихідних сигналів тощо). Якщо усі ці процедури включити в моделюючі конфігурації Задачі (00...0F), – вони стануть схожими на динозаврів: величезними, незграбними і незмінними. Щоб уникнути аналогічного кінця еволюції, до моделюючих конфігурацій включено лише найпростіші процедури введення даних і діагностики. Більшість процедур підготовки вхідної інформації та обробки вихідних даних і візуалізації виносяться в допоміжні й сервісні конфігурації Задачі, які виконуються окремо від моделюючих, тобто в інших екземплярах Диспетчера (синхронно або асинхронно: до моделювання чи після нього). Передача інформації між моделюючими, допоміжними та сервісними конфігураціями тієї самої Задачі виконується за допомогою файлів JLF та CPF. Інформаційний зв'язок між різними Задачами не передбачено.

Крім простоти розробки невеликих програм, такий підхід має ще одну перевагу. А саме: якщо користувач розуміє деякі правила написання Задачі або (альтернативно) знає формат кодування інформації в файлах JLF і CPF, він може створити власні програми підготовки даних і діагностики, якщо вони знадобляться. Більше того, це можна здійснити навіть під час виконання моделюючої конфігурації Задачі, наприклад для «миттєвого фотографування» якоїсь незвичайної конфігурації електронного потоку.

Усі форматовані дані системи (за винятком функцій розподілу та повідомлень) являють собою логічний набір так званих вхідних-вихідних параметрів (Input-Output Parameters, IOP).

Вони можуть бути скалярами (наприклад, Tube_Width) або векторами [як DelayLine2_VanesWidth(1:DelayLine2_VanesNumb)]. Їх мнемонічні назви (на додачу до цифрових, наприклад, Z101-11) є унікальними в межах Задачі та раціонально корелюють між різними Задачами, якщо ними моделюються схожі за конструкцією прилади (скажімо, між Задачами CFD, Cyclam і Magnol). Більшість IOP подібні до відповідних інформаційних об'єктів логічної структури програмної системи. Проте, для зручності користувача їхні одиниці виміру можуть відрізнятися (наприклад, міліметри замість метрів). Формати IOP та інформаційного об'єкта можуть також відрізнятися, якщо інформаційний об'єкт являє собою матрицю або структуру (оскільки IOP може бути лише скаляром або вектором) [наприклад, DelayLines_VanesWidth(1:DelayLines_Numb, 1:DelayLines_VanesMaxNumb)].

Об'єми вхідної та вихідної інформації в процесі прогону можна варіювати в широких межах (від максимального до нуля) за допомогою так званих чисел стану вводу-виводу (Input-Output Condition Numbers, IOCN), від 0 до 6. Кожному вхідному та вихідному параметру заздалегідь присвоюється певне число вводу-виводу (Input-Output Number, ION), від 1 до 7 залежно від його інформаційної цінності (1 – найважливіші параметри, 7 – приховані). Параметр вводиться або виводиться лише у випадку, якщо його ION менше або дорівнює поточному IOCN. При IOCN = 0 програмна система тимчасово стає «річчю в собі», що зручно при тривалих прогонах.

Загальний вигляд «лицьової панелі» системи TULIPgm наведено на рис. 5. У її верхній частині розміщене головне вікно, де відображається найважливіша інтерактивна інформація, включаючи поточний розподіл електронного потоку в приладі, значення деяких IOP, довідкову інформацію, логотипи тощо. Під цим вікном розташовано область повідомлень з кількома найпізнішими вхідними та вихідними звітами у форматі «телетайп». У нижній частині панелі розміщено віконце вводу для контрольного відображення інформації, що вводиться з клавіатури та миші. В недіалоговому режимі системи (під час відсутності вводу) воно затінене. Праворуч від області повідомлень розташовані кнопки зовнішніх переривань.

Приклади застосування системи TULIPgm

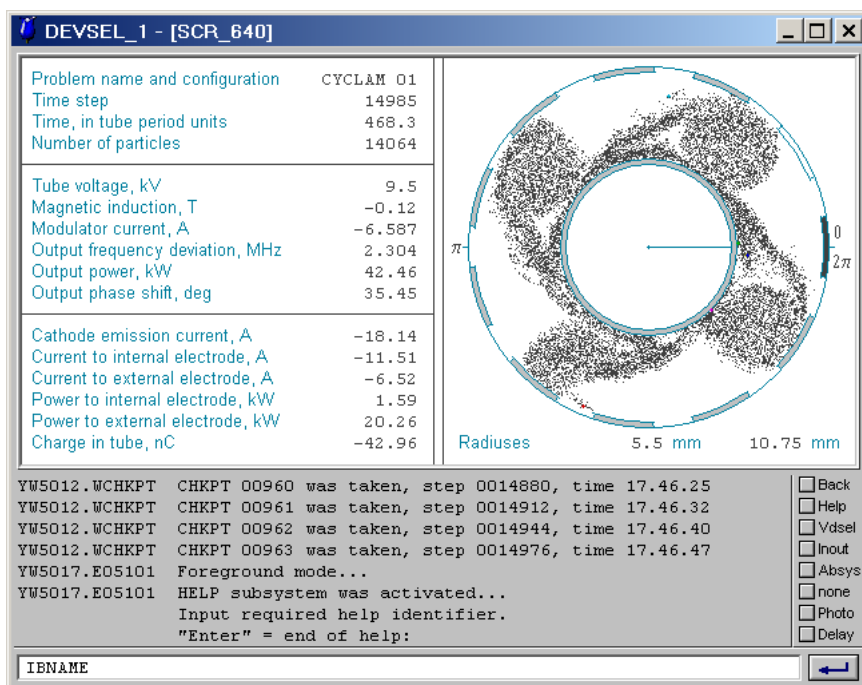


Рис. 5. Загальний вигляд працюючої системи TULIPgm

Система моделювання TULIPgm може бути використана як для дослідження фізичних явищ взаємодії електронних потоків з електромагнітними хвилями, так і для конструкторського аналізу та оптимізації НВЧ приладів. Реалізація спектрального підходу дозволяє використовувати цю систему для вирішення задач електромагнітної сумісності при розробці нових приладів [12]. Спільне використання різнорівневих спектральних моделей [17] забезпечує широкосмуговий спектральний моніторинг вихідних сигналів з достатньою точністю.

Як зразок моделювання перехідних процесів у приладах М-типу на рис. 5 показано конвективні явища в 40-кВт амплітроні D-діапазону. Обертові солітоноподібні хмари на вершинах спиць можуть збільшити потужність анодного бомбардування, оскільки швидкість часток на зовнішніх межах хмар збільшується. Крім того, коливання розмірів і форм хмар від спиці до спиці підвищують рівень шуму приладу.

Як зразок спектрального моделювання на рис. 6 показано розподіл спектральної щільності потужності (PSD) вихідного сигналу амплітрона в діапазоні частот від 625 до 1875 МГц за умови, що вхідний сигнал є чисто гармонійним. Підвищені значення PSD поблизу несучої частоти викликані, зокрема, шумом алгоритму PIC. Проте флуктуації електронної хмари також викликають стохастичну низькочастотну модуляцію вихідного сигналу. Його частотний розподіл можна знайти як межу загальної функції PSD при зростанні кількості часток.

Усі чисельні результати, наведені у [8–12], також були отримані за допомогою системи TULIPgm.

Висновки

1. Сучасний етап розвитку збройних сил України потребує проведення масштабних досліджень у наукових та навчальних установах відповідного профілю щодо розробки ефективних засобів протидії масованим атакам малих безпілотних літальних апаратів, зокрема, заснованих на принципах невідного ураження електроніки БПЛА короткими електромагнітними імпульсами потужного НВЧ генератора. Одними з перспективних видів джерел електромагнітних коливань для цієї мети слід вважати вакуумні НВЧ прилади.

2. Незважаючи на досить довгу історію розробки, система моделювання вакуумних НВЧ приладів TULIPgm залишається цілком сучасною системою. Це результат кількох радикальних реконструкцій коду, з усуненням застарілих і непотрібних елементів, з одного боку, і імплантацією перспективних та корисних функцій моделі та програми – з іншого. Такий підхід, природно, більш трудомісткий і дорогий, однак альтернатива йому – поступова еволюція – призводить, як правило, до накопичення непотрібних фрагментів з застарілих мов програмування й операційних систем.

3. Поряд з кодуванням нової версії системи TULIPgm найближчим завданням є переклад усіх коментарів до програми та інтерфейсних текстів англійською мовою. Серед довгострокових перспектив удосконалення системи можна зазначити:

- завершення основної Задачі CFD, включаючи її 3D модель;
- реалізацію спектрального підходу для ЛБВ та клістронів;
- впровадження алгоритмів, заснованих на безпосередньому інтегруванні рівнянь Максвелла методом скінчених різниць (так званих спектральних моделей нульового рівня [17]) для моделювання релятивістських магнетронів.

Додаток. Ключі збірки Задачі CFD

RectAng = 0 для циліндричних приладів (як магнетрон); 1 для прямокутних (як лінійна ЛБХ М-типу).

ReEntra = 0 для приладів з незамкнутим електронним потоком (як дематрон); 1 для приладів з замкнутим електронним потоком (як амплітрон).

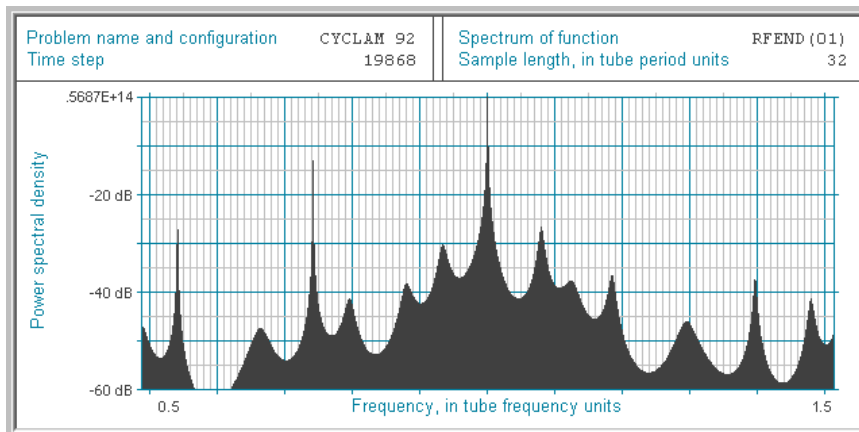


Рис. 6. Спектр вихідного сигналу амплітрона

StaWave = 0 для приладів біжучої хвилі (як амплітрон); 1 для приладів стоячої хвилі (як магнетрон).

TwoDims = 0 для 3D моделей $[(z, r, \varphi)$ або $(x, y, z)]$; 1 для 2D моделей $[(r, \varphi)$ або $(y, z)]$.

VarChar = 0 для моделей з фіксованим зарядом часток; 1 для моделей зі змінним зарядом часток.

Подяки

Визначення напряму досліджень, постійна увага та всебічна підтримка на перших, найбільш відповідальних етапах розробки програмної системи TULIPgm здійснювалися проф. О.Г. Шеїним. Вагомою була ґрунтовна багаторічна допомога колективу обчислювального центру Фізико-технічного інституту низьких температур (Харків), керівники центру на той час – К.В. Маслов і В.Р. Літвінов.

Список літератури:

1. Rogers J.P. (2024) De Gruyter Handbook of Drone Warfare. 1st edn. De Gruyter. Available at: <https://www.perlego.com/book/4512899/de-gruyter-handbook-of-drone-warfare-pdf> (Accessed: 3 May 2025).
2. R.R.U. Inc. (2025) -drone Technology to Detect and Stop 10 Types of Counter Drones Today. Available at: <https://www.robinradar.com/resources/10-counter-drone-technologies-to-detect-and-stop-drones-today> (Accessed: 04 May 2025).
3. Atherton K.D. (2023) The Air Force Used Microwave Energy to Take Down a Drone Swarm. Available at: <https://www.popsci.com/technology/thor-weapon-drone-swarm-test/> (Accessed: 03 May 2025).
4. Nikolov B. (2025) UK's new microwave weapon neutralizes drone swarms for pennies, Bulgarian Military Industry Review. Available at: <https://bulgarianmilitary.com/2025/04/17/uks-new-microwave-weapon-neutralizes-drone-swarms-for-pennies/> (Accessed: 04 May 2025).
5. Tsimring S.E. Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. Wiley-Interscience, 2006. 574 p.
6. Carter R.G. Microwave and RF Vacuum Electronic Power Sources. Cambridge Univ. Press., 2018. 808 p.
7. Hockney R.W., Eastwood J.W. Computer Simulation Using Particles. McGraw-Hill, Inc., 1981. 562 p.
8. Gritsunov A.V., Shein A.G. Computer simulation of transient processes during the interaction of an electron beam with a backward wave in M-type amplifiers with distributed emission // Radiotekhnika. 1983. No 65. P. 93–99.
9. Churyumov G.I., Gerasimov V.P., Gritsunov A.V., Zakorin V.A. Prospects of applying a computational experiment to the concept and the use of crossed-field devices // Telecommunications and Radio Engineering. 1998. V. 52. No 12. P. 39–48.
10. Gritsunov A.V., Kozorezov G.G., Kopot M.A. On increasing of the gain ratio of crossed field double-row amplifiers // Telecommunications and Radio Engineering. 2006. 65. No 8. P. 731–737.
11. Gritsunov A.V. On the reasons for noises in cross-field devices // Telecommunications and Radio Engineering. 2005. V. 64. No 11. P. 939–958.
12. Vasyanovich A.V., Gritsunov A.V., Nikitenko A.N., Horunzhii M.O. General principles of spectral modeling of microwave devices // Telecommunications and Radio Engineering. 2003. V. 60. No. 1–2. P. 88–99.
13. Gritsunov A.V. On a spectral approach to simulation of microwave devices // Journal of Communications Technology and Electronics. 2004. V. 49. No 7. P. 829–832.
14. Gedney S.D. Introduction to the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method for Electromagnetics. Springer Cham, 2011. 236 p.
15. Jin J.-M. The Finite Element Method in Electromagnetics. Wiley-IEEE Press, 2014. 876 p.
16. Bilotserkivska A.I., Bondarenko I.M., Gritsunov A.V., Babychenko O.Yu., Sviderska L.I., Vasyanovych A.V. Decomposition of electromagnetic potentials in partial functions of dispersive electrodynamic lines // Ukrainian J. of Physics. 2024. V. 69. No 6. P. 382–394.
17. Gritsunov A.V. Methods of calculation of nonstationary nonharmonic fields in guiding electrodynamic structures // Journal of Communications Technology and Electronics. 2007. V. 52. No 6. P. 601–616.
18. Ziegler C.A. Programming System Methodologies. Prentice-Hall, Inc, 1983. 308 p.
19. Hyde R. The Art of Assembly Language Programming. No Starch Press, Inc., 2010. 732 p.
20. Feldman M.B., Koffman E.B. Ada: Problem Solving and Program Design. Addison-Wesley, 1993. 795 p.
21. Chapra S.C., Canale R.P. Numerical Methods for Engineers. McGraw-Hill Ed., 2015. 970 p.
22. Gritsunov A.V. About simulation of fields in large particles model // Proc. 1997 SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectronics Conf. Natal (Brazil). 1997. Vol. 2. P. 517–519.
23. Marple S.L., Jr., Digital Spectral Analysis with Applications. Prentice-Hall, Inc., 1987. 492 p.
24. Gritsunov A.V., Turenko L.Y. Harmonic decomposition of an exciting current in simulation of the electron devices // Telecommunications and Radio Engineering. 2002. V. 58. No 11–12. P. 56–67.

Надійшла до редколегії 05.03.2025

Відомості про авторів:

Бондаренко Ігор Миколайович – д-р фіз.-мат. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідуючий кафедрою мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Україна; e-mail: ihor.bondarenko@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3907-6785>

Гнатенко Олександр Сергійович – канд. фіз.-мат. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідуючий кафедрою фізичних основ електронної техніки, Україна; e-mail: oleksandr.hnatenko@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7722-0923>

Грицунов Олександр Валентинович – д-р фіз.-мат. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Україна; e-mail: alexander.gritsunov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2258-4006>

Пашченко Олексій Георгійович – канд. фіз.-мат. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Україна; e-mail: olexiy.pashchenko@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8927-3811>

Карнаушенко Володимир Петрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Україна; e-mail: vladimir.karnaushenko@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7744-2569>

Копоть Михайло Андрійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, завідуючий навчальною лабораторією кафедри програмної інженерії, Україна; e-mail: mykhaylo.kopot@nure.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7163-8904>