

## КОМП'ЮТЕРНИЙ ІМІТАТОР ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Д. т. н. В. А. Мокрицький, К. О. Головченко

Одеський національний політехнічний університет  
Україна, м. Одеса  
mokrcki37@gmail.com

*Створено комп'ютерний імітатор для дослідження характеристик напівпровідникових елементів на прикладі біполярного транзистора з використанням мови програмування Tcl/Tk, що дозволяє суттєво скоротити час дослідження та покращити ефективність інтерпретації його результатів.*

*Ключові слова: Tcl/Tk, модель, комп'ютерне моделювання, імітатор, транзистор.*

Важливий етап створення сучасної радіоелектронної апаратури (РЕА) — дослідження характеристик і параметрів напівпровідникових елементів (діодів, транзисторів, інтегральних схем тощо). Для виконання цього етапу необхідна наявність як досвіду виконавців, так і ефективних технічних засобів. Ця задача частіше вирішується шляхом використання спеціалізованих метрологічних пристроїв. Такий шлях має певні очевидні недоліки: суттєві фінансові витрати на придбання та обслуговування, громіздкість, примітивність методики обробки даних дослідження тощо.

Усунення цих недоліків можливе при застосуванні інформаційних технологій. Один з варіантів цього — створення моделей електронних елементів і комп'ютерних імітаторів для їх дослідження. Переваги такого підходу очевидні: доступність і можливість застосування сучасних простих комп'ютерів, менші витрати коштів, наявність інформативних математичних моделей характеристик напівпровідникових елементів тощо. Саме такий шлях використовували автори даної роботи, мета якої — створення комп'ютерних імітаторів на основі математичних моделей характеристик напівпровідникових матеріалів, діодів, транзисторів, фото- та терморезисторів для дослідження їх параметрів як елементної бази РЕА та при навчанні спеціалістів цієї галузі.

Основою технології комп'ютерного моделювання є вибір оптимального варіанту мови створення програмного продукту. В даній роботі серед відомих обрано мову Tcl/Tk, яка має ряд суттєвих переваг.

Tcl/Tk – мова програмування високого рівня [1]. Інтерпретатор Tcl можна включити до складу прикладних програм. В Tcl входить набір інструментів створення графічних інтерфейсів користувача під назвою Tk. Якщо включити у програму Tcl-інтерпретатор, можна отримати можливість виконання простих операцій і поєднувати їх у сценарій, що повністю задовольняє потреби користувача.

Така мова дозволяє проводити автоматизацію рутинних процесів та розробку платформо-незалежного програмного забезпечення при простоті використання. Завдяки такому підходу спрощується процес розробки та модернізації програми.

Tcl/Tk дозволяє розширення за рахунок прикладних програм, які мають можливість визначення нових Tcl-команд. В результаті застосування подібного підходу з'являється можливість створення прикладної програми як набору відносно простих елементів, написаних мовою, що компілюється, і оформлених як Tcl-команди. Для об'єднання простих елементів чи програмних примітивів у прикладній програмі використовується Tcl-сценарій.

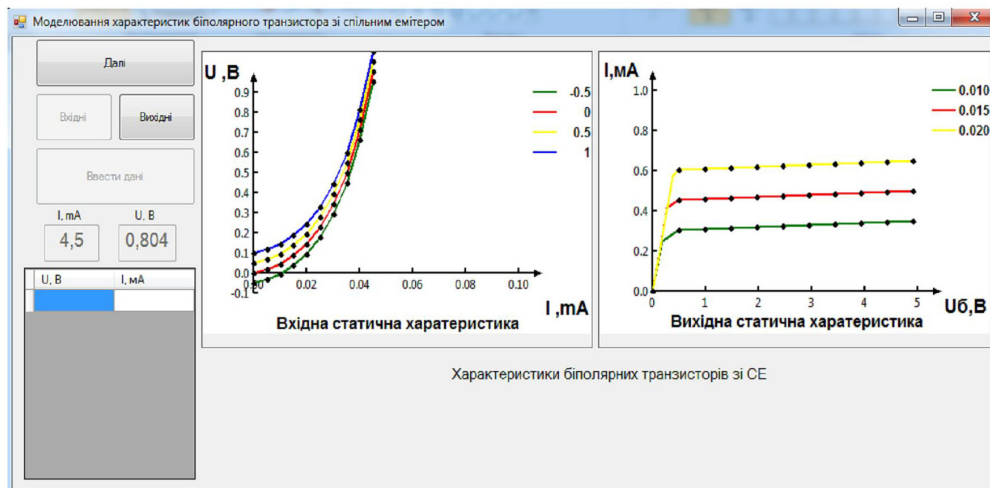
У даній роботі застосовано сценарії Tcl/Tk для програмування інтерфейсу користувача, що дає можливість скорочення часу від редагування вихідного коду до запуску його на виконання. Tcl-команди реалізують інтерфейс набагато більш високого рівня у порівнянні зі стандартними засобами створення інтерфейсів користувача [2]. Крім того, програмний продукт, написаний кросплатформною мовою Tcl/Tk, можна використовувати не тільки на операційних системах сімейства Windows, а також на таких безкоштовних, як Linux та Unix. За рахунок цього витрати на використання створеного в роботі комп'ютерного імітатора (КИ) будуть мінімальними.

Розглянемо використання створеного імітатора на прикладі дослідження температурної залежності вихідних характеристик біполярного транзистора в схемі із загальним емітером. Для їх моделювання використовуємо відповідне спрощене рівняння Молла — Еберса [3]:

$$I_k = \alpha_N I_e - I_{k0} \left( \exp \frac{U_k}{\phi_T} - 1 \right),$$

де  $I_k$ ,  $I_e$  — колекторний та емітерний струми, відповідно;  $U_k$  — напруга колектора.

Створена на основі такої моделі програма дозволяє КІ видати відповідну екранну форму (див. рисунок).



Екранна форма: температурна залежність вхідних та вихідних характеристик біполярного транзистора в схемі із загальним емітером

Технологія моделювання характеристик інших елементів аналогічна наведеному прикладу. Адекватність та визначеність таких моделей перевірена в низькочастотній та середньочастотній областях шляхом натурального вимірювання характеристик елементів за допомогою пристроїв ПНХТ-4, TR-4718 (Угорщина), точність яких складає 5–8%. Розбіжність результатів комп'ютерного моделювання та натурних вимірювань не перевищує 10%.

Таким чином, в роботі створено комплекс комп'ютерних імітаторів, які дозволяють досліджувати та вивчати характеристики деяких напівпровідникових матеріалів, діодів, транзисторів та інших елементів РЕА. Створені імітатори мають достатню оперативність проведення досліджень та точність моделювання і можуть використовуватися для навчання спеціалістів з мінімальними витратами матеріальних ресурсів.

#### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Visual Tcl документація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://vtcl.sourceforge.net>.
2. Непран І. В., Буртний Д. В., Кравченко Ю. Ю., Мокрицький В. А. Інформаційно-програмні заходи проектування модулів моделювання напівпровідникових елементів електроніки // Матер. 13-ї Всеукраїнської конф. студентів та молодих науковців «Інформатика, інформаційні системи та технології». — Одеса, 2016. — С. 70–73.
3. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов. — Москва: ГЭИ, 1983.

V. A. Mokritsky, K. O. Holovchenko

#### Computer imitator for the investigation of the characteristics of semiconductor electronics

*A computer imitator was created to study the characteristics of semiconductor elements on an example of a bipolar transistor using the Tcl/Tk programming language, which significantly reduces the time of research and improves the efficiency of the results interpretation.*

*Keywords: Tcl/Tk, model, computer simulation, imitator, transistor.*