

## **АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ SIMULINK НА ПРИКЛАДІ ТРАНЗИСТОРНОГО ПІДСИЛЮВАЧА**

**І.В. МЕЛЬНИК**

Розглянуто засоби моделювання програмного комплексу Simulink на прикладі моделі транзисторного підсилювача, який зібрано за схемою із загальним емітером. Показано, що для створення моделей компонент електронних схем найбільш важливими є математичні блоки, а для моделювання електричних з'єднань зручно використовувати моделі електричних та електронних компонент. Для моделювання складних електронних схем доцільно використовувати блочно-ієрархічний підхід. Показано, що засоби моделювання програмного комплексу Simulink є дуже ефективними для побудови моделей електронних схем і можуть становити реальну альтернативу засобам моделювання сучасних схемотехнічних систем автоматизованого проектування.

### **ВСТУП**

Натепер існує велика кількість спеціалізованих систем автоматизованого проектування (САПР), призначених для моделювання простих та складних електронних схем. Серед них особливо слід відзначити САПР OrCAD, яка дозволяє аналізувати перехідні процеси в цифрових та аналогових електронних схемах на етапі їх проектування, а також їх часові, амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики. Схемотехнічні САПР можуть аналізувати чутливість схеми (реакцію на невеликі зміни вхідного сигналу та елементів схеми), спектри сигналів у будь-яких вузлах схеми та отримувати інформацію про інші важливі особливості роботи модельованої електронної схеми [1]. Іншою важливою відмітною рисою схемотехнічних САПР є те, що вони мають величезні бібліотеки різноманітних електронних компонентів, що значно спрощує їх використання під час проектування реальних електронних схем.

Проте варто відзначити, що використовувані засоби схемотехнічного проектування мають також низку істотних недоліків, серед яких насамперед необхідно відзначити такі:

- складність математичного опису моделей електронних компонент, які формуються;
- складність розвитку бібліотек (існуючі бібліотеки компонент не завжди влаштовують проектувальників);
- відсутність системного підходу до опису моделей електронних компонент.

У цілому зазвичай всі проекти схемотехнічних САПР мають описовий характер, а можливості використання в них ієрархічного підходу та сучасних засобів модульного програмування є вкрай обмеженими. Усі моделі компонент через відсутність у схемотехнічних САПР математичних блоків

описуються декларативно з використанням засобів лінгвістичного програмування, а сучасні засоби візуального програмування застосовуються лише для формування моделей електронних схем із моделей компонент. Указані недоліки дещо ускладнюють опис складних електронних схем та систем з використанням засобів сучасних схемотехнічних САПР.

## **ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ**

Натепер існує велика зацікавленість у використанні для моделювання сучасних складних електронних схем програмних засобів, орієнтованих на системне моделювання, серед яких особливе місце посідає програмний комплекс Simulink [2–4]. Перевагою цього підходу є можливість опису логіки роботи складних схем та систем в ієрархічних проектах з використанням засобів модульного програмування через створення підсистем. Математичні моделі електронних компонент у Simulink можна легко створювати за допомогою блоків математичних бібліотек; для цього використовуються сучасні засоби візуального програмування.

Програмні комплекси, призначені для системного моделювання, мають спеціальні засоби, використовувані для експертної оцінки надійності та якості спроектованої електронної апаратури [2–4]. Важливою тут також є можливість використання апарату нечіткої логіки та подвійного моделювання, що дозволяє аналізувати роботу електронних схем як реакцію на конкретні події з урахуванням імовірності їх появи. Це дозволяє у динамічному режимі змінювати логіку програмування сучасних електронних схем з огляду на специфіку та особливості їх функціонування.

Проте можливості використання наявних засобів моделювання, програмного комплексу Simulink для аналізу та синтезу електронних схем дотепер ще не вивчені досконало.

**Мета роботи** — аналіз таких можливостей на прикладі побудови відносно простої моделі транзисторного підсилювача.

## **ОПИСАННЯ ЗАСОБІВ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ SIMULINK, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ**

Головними блоками програмного комплексу Simulink, які можуть бути використані для моделювання електронних схем та систем, є такі [2–4]:

- блоки моделей сигналів;
- блоки моделей реєструвальних пристроїв;
- математичні блоки, які можуть бути використані для створення моделей нових компонентів;
- блоки нелінійних систем та дискретних сигналів, які містять моделі таких електронних пристроїв, як комутатор, мультиплексор, квантувальний пристрій, обмежувач сигналу та інших досить складних функціональних пристроїв, за допомогою яких будуються сучасні електронні схеми та системи;

- блоки математичної логіки для аналізу особливостей роботи цифрових електронних схем;
- блоки електронних таблиць для створення моделей електронних компонент за експериментальними або довідковими даними;
- блоки для аналізу перехідних процесів у системах керування;
- блоки електричних та електронних компонент.

Засоби програмного комплексу Simulink, призначені для моделювання електронних схем та систем, постійно розширюються. Зокрема, у нових версіях системи додано блоки аналізу сигналів та зображень, а також блоки для моделювання телекомунікаційних систем та систем надвисоких частот [2]. Із засобів проектування, які наявні у програмному комплексі Simulink, для опису електронних схем можна ефективно використовувати засоби створення підсистем [2–4].

Важливим є також установлення зв'язків між моделями сигналів та моделями електронних компонентів. Річ у тім, що безпосередньо подати сигнал на електричну або електронну схему у програмному комплексі Simulink неможливо, проте можна подати сформований засобами системного моделювання сигнал на джерело напруги або на джерело струму, яке керується сигналом. Саме ці блоки дозволяють у Simulink зв'язувати моделі сигналів із моделями компонент електричних та електронних схем. Крім цього, у Simulink не існує окремих моделей опору, ємності та індуктивності, проте їх можна легко створити на основі існуючих моделей послідовного та паралельного RLC-контурів. Наприклад, для створення моделі опору за допомогою паралельного контуру достатньо задати необхідне значення опору, значення ємності взяти нульовим, а значення індуктивності — рівним нескінченності. Така модель опору буде працювати як для постійної, так і для змінної напруги. Вікно програми Simulink для створення відповідної моделі показано на рис. 1 [2, 4].

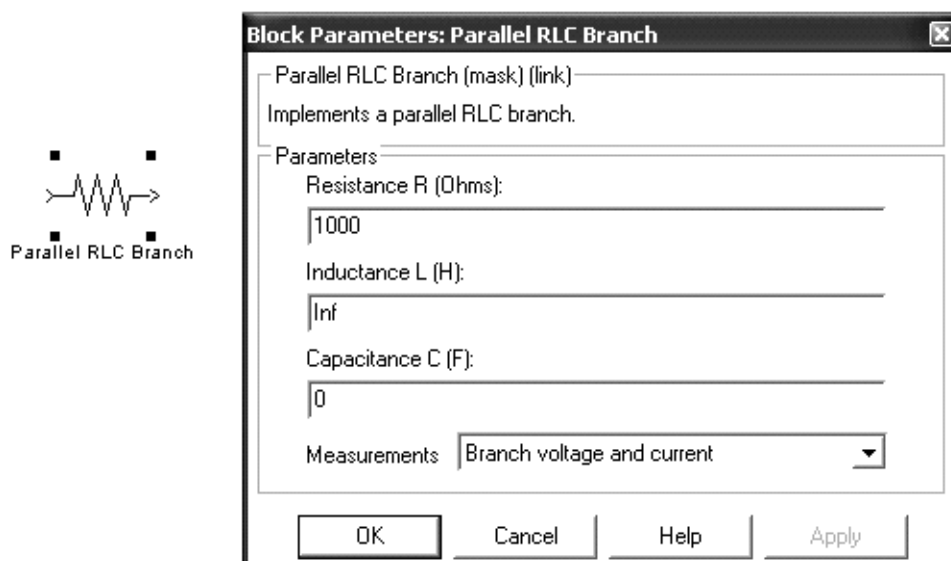


Рис. 1. Приклад створення моделі опору у програмному комплексі Simulink

Аналогічно створюються моделі ємності та індуктивності. Наприклад, вікно для створення моделі ємності показано на рис. 2.

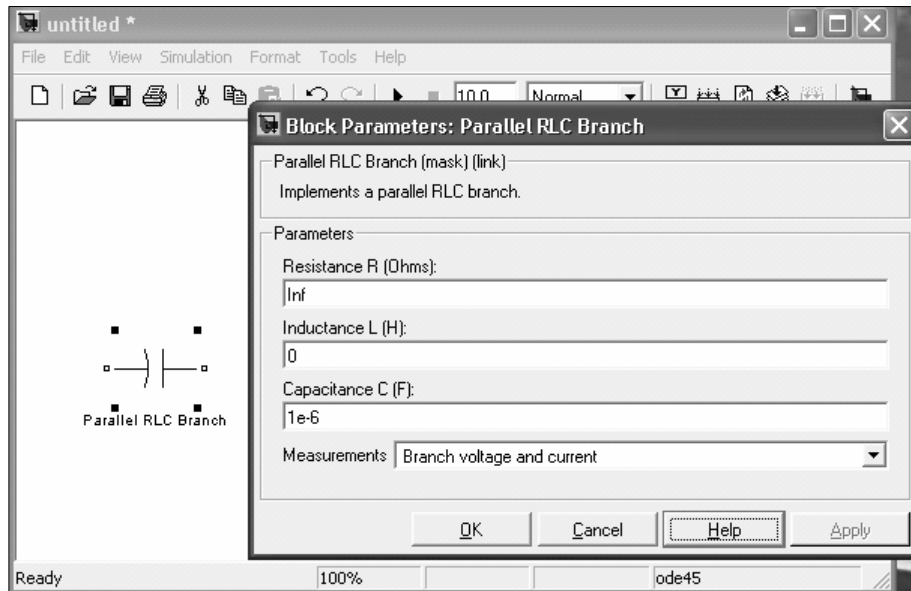


Рис. 2. Приклад створення моделі ємності у програмному комплексі Simulink

Для створення моделей нових компонент на основі їх математичного опису можуть бути використані математичні блоки та засоби візуального програмування. Для опису складних схем зручно використовувати моделі підсистем. Далі розглянуто приклад побудови за допомогою засобів програмного комплексу Simulink моделі транзисторного підсилювача, який складено за схемою із загальним емітером [5].

## ОПИСАННЯ СХЕМИ, ЯКА МОДЕЛЮЄТЬСЯ, ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Принципову схему модельованого транзисторного підсилювача показано на рис. 3. Вхідний каскад підсилювача містить фільтрувальну ємність  $C_1$  та подільник напруги  $R_1, R_2$  для подавання зміщення на базу біполярного транзистора. Живлення підсилювача забезпечується через коло резисторів  $R_3, R_4$  та ємність  $C_2$ , яка призначена для фільтрування змінної складової у колі живлення транзистора. Навантаження підсилювача на схемі, зображеній на рис. 3, показано у вигляді опору  $R_H$  та ємності  $C_H$ , тобто передбачається, що навантаження має резистивно-ємнісний характер.

Для формування моделі схеми, показаної на рис. 3, у програмному комплексі Simulink необхідно спочатку записати математичну модель для біполярного транзистора VT1. Ця модель має описувати залежність струму бази  $I_b$  від напруги на базі  $U_{be}$  та від напруги на колекторі  $U_{ce}$ . Для схеми, яка моделюється, скористаємося відомою моделлю Еберса–Мола, яка у загальному вигляді записується через систему рівнянь [5, 6]:

$$I_e = I'_{e0} \left( \exp\left(\frac{U_e}{\phi T}\right) - 1 \right) - \alpha_{0I} I'_{k0} \left( \exp\left(\frac{U_k}{\phi T}\right) - 1 \right);$$

$$I_k = \alpha_{0N} I'_{e0} \left( \exp\left(\frac{U_e}{\phi T}\right) - 1 \right) - I'_{k0} \left( \exp\left(\frac{U_k}{\phi T}\right) - 1 \right); \quad (1)$$

$$I_{\phi} = (1 - \alpha_{0N}) I'_{e0} \left( \exp\left(\frac{U_e}{\phi T}\right) - 1 \right) - (1 - \alpha_{0I}) I'_{k0} \left( \exp\left(\frac{U_k}{\phi T}\right) - 1 \right),$$

де  $I_{\phi}$  — струм бази;  $I_e$  — струм емітера;  $I_k$  — струм колектора;  $I_{e0}$  — зворотний струм емітерного переходу транзистора;  $I_{k0}$  — зворотний струм колекторного переходу транзистора;  $\alpha_{0N}$  — статичний коефіцієнт передавання струму для нормального ввімкнення транзистора;  $\alpha_{0I}$  — статичний коефіцієнт передавання струму для інверсного ввімкнення транзистора;  $U_T$  — тепловий потенціал;  $I'_{e0}$  та  $I'_{k0}$  — теплові струми емітерного та колекторного переходів, які обчислюються таким чином [5, 6]:

$$I'_{e\phi 0} = \frac{I_{e0}}{1 - \alpha_{0N} \alpha_{0I}}; \quad I'_{k\phi 0} = \frac{I_{k0}}{1 - \alpha_{0N} \alpha_{0I}}. \quad (2)$$

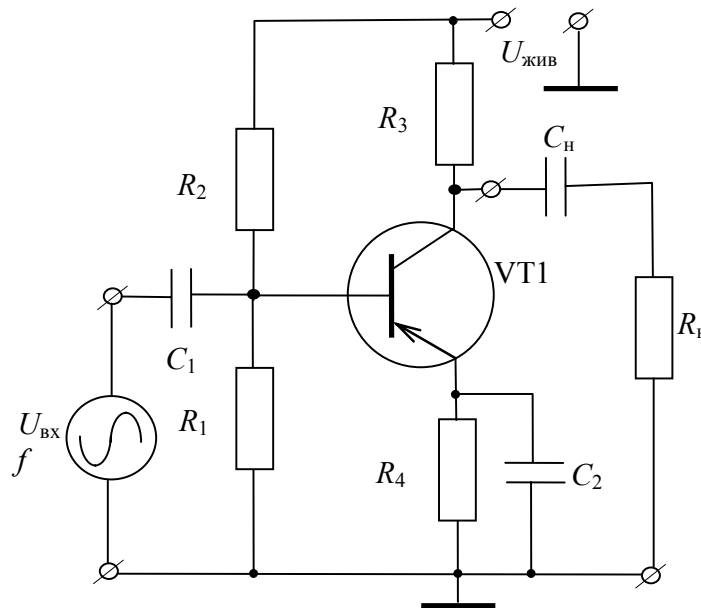


Рис. 3. Схема транзисторного підсилювача із загальним емітером

Недоліком системи рівнянь (1) і (2) щодо її практичного використання є складність обчислення коефіцієнтів  $\alpha_{0N}$  та  $\alpha_{0I}$ . Виходячи зі співвідношень (1), (2), можна записати спрощений вираз для струму бази  $I_{\phi}$ , який використано у цій роботі для побудови моделі біполярного транзистора у системі Simulink [5]:

$$I_{\bar{6}} = I_e - I_k = I_{e0}(1 - \alpha) \left( \exp\left(\frac{U_{\bar{6}e} + h_{12}U_{ке}}{U_T}\right) - 1 \right) + I_{k0} \left( \exp\left(\frac{U_{\bar{6}e} - U_{ке}}{U_T}\right) - 1 \right), \quad (3)$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт передавання струму емітера;  $h_{12}$  — коефіцієнт зворотного зв'язку. Рівняння (3) записано на підставі третього рівняння системи (1).

У тому випадку, коли параметри транзистора  $\alpha$  та  $h_{12}$ , задані у формулі (3), невідомі, проте відомі його перехідні характеристики, можна подати ці характеристики у вигляді таблиці та використати блоки апроксимації електронних таблиць програмного комплексу Simulink, які дозволяють знаходити прості аналітичні вирази для табульованих значень функції [2, 3].

### ПОБУДОВА МОДЕЛІ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ SIMULINK

Будемо будувати модель біполярного транзистора за допомогою блоків математичних функцій. У цьому випадку головними блоками, які будуть використовуватися, є блоки елементарних математичних операцій, а саме: суматор, помножувач та подільник. Блоки додавання і множення у програмному комплексі Simulink є універсальними та багатофункціональними. Багатофункціональність цих блоків полягає у тому, що функцію віднімання можна виконати за допомогою суматора, а функцію ділення — за допомогою помножувача, якщо змінити призначення їх входів [2, 3]. Крім цих двох блоків, у моделі транзистора, яка формується, використано блок експоненціальної функції та блок підсилювача, який у цьому випадку виконує функцію множення сформованої функціональної залежності на задане число. Таке наочне подання математичних функцій у вигляді графічних зображень окремих блоків та встановлених між ними зв'язків називається візуальним програмуванням [2, 3]. Розглянемо головні переваги такого подання математичних функцій у вигляді графічних схем.

1. Наочність та простота формування математичних моделей на відміну від засобів лінгвістичного програмування.

2. Можливість використання блочно-системного та ієрархічного підходів для встановлення зв'язків між окремими блоками алгоритму, що у багатьох випадках спрощує аналіз обчислювальних особливостей алгоритму та прискорює формування графічного подання його обчислювальної схеми засобами програмного комплексу Simulink.

3. Програмний комплекс Simulink повністю інтегрований із системою науково-технічних розрахунків MatLab. Це дає можливість не обмежуватись спрощеними математичними моделями, а включати у проекти аналізу електронних схем складні математичні розрахунки, зокрема ітераційні. У цьому випадку складні математичні алгоритми можуть бути реалізовані засобами лінгвістичного програмування системи MatLab [2, 3].

4. Простота формування моделей однотипних компонент, наприклад діодів або транзисторів, через зміну параметрів їх математичної моделі.

Як впливає із сформульованих положень засоби візуального програмування програмного комплексу Simulink, призначені для формування математичних моделей, є дещо обмеженими. Тому для виконання більш складних обчислень часто доводиться використовувати більш розвинені засоби лінгвістичного програмування системи MatLab (у цьому випадку зв'язок між програмними комплексами Simulink та MatLab формується за допомогою відповідних блоків програмування [2, 3]). Проте в останніх версіях Simulink розробники ввели додаткові можливості для опису з використанням засобів візуального програмування розгалужених та циклічних обчислювальних процесів, що значно розширило інструментальні засоби Simulink, призначені для створення нових ускладнених математичних моделей методами візуального програмування. Тут особливо цікавими є засоби подійного моделювання StateFlow, які дозволяють описувати стани складної системи з використанням діаграм станів, теоретичним підґрунтям для яких є методи теорії ймовірностей та ланцюги Маркова [2, 3].

Узагальнену математичну модель біполярного транзистора, яка побудована за допомогою графічних засобів програмного комплексу Simulink, показано на рис. 4, а параметричну модель транзистора, побудовану на основі цієї узагальненої моделі з використанням математичних блоків програмного комплексу Simulink, — на рис. 5.

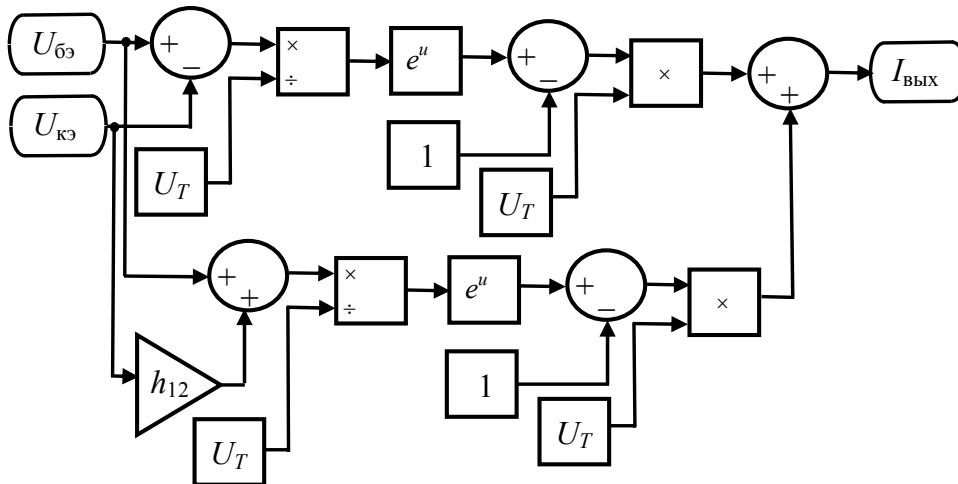


Рис. 4. Узагальнена математична модель біполярного транзистора

Відмітною рисою побудованої моделі біполярного транзистора є те, що її реалізовано у вигляді підсистеми, і її параметри легко змінити через діалогове вікно [2; 3]. Крім цього, модель електронних компонентів, яка реалізована у вигляді підсистеми, має входи та виходи (рис. 5), що значно спрощує побудову на її основі моделей електронних схем. Реальні параметри моделі, заданої співвідношенням (3), для використовуваного транзистора можна взяти із довідкової літератури. Для наведеного прикладу всі числові значення взято для транзистора КТ 361 А [7].

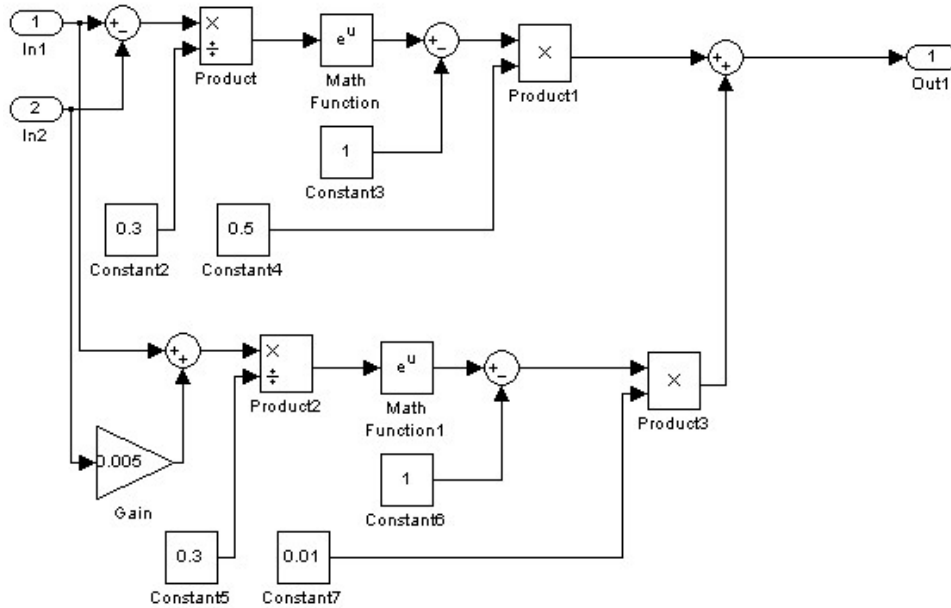


Рис. 5. Математична модель біполярного транзистора із заданими параметрами, яку побудовано з використанням засобів візуального програмування програмного комплексу Simulink

### ПОБУДОВА МОДЕЛІ СХЕМИ ТРАНЗИСТОРНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

Модель біполярного транзистора (рис. 5) може бути використано для побудови моделі схеми транзисторного підсилювача (рис. 3). Іншими елементарними моделями, які необхідно використати для побудови моделі схеми підсилювача, є моделі джерел постійної та змінної напруг, а також моделі блоків компонент електричних схем [2–4]. Описуючи схему підсилювача (рис. 3), варто мати на увазі, що на базу транзистора для встановлення його робочого режиму подається постійна напруга, яка обчислюється із співвідношення [5]:

$$U_{\text{бе}} = \frac{U_{\text{жив}} R_1}{R_1 + R_2}.$$

Вихідний каскад підсилювача можна подати у вигляді спрощеної еквівалентної схеми (рис. 6) [4].

Транзисторний підсилювач, схему якого показано на рис. 3, у програмному комплексі Simulink можна подати у вигляді графічної моделі (рис. 7).

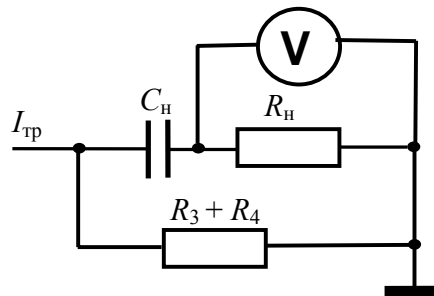


Рис. 6. Електрична модель вихідного каскаду транзисторного підсилювача



Розглянемо головні особливості побудови моделі, зображеної на рис. 7.

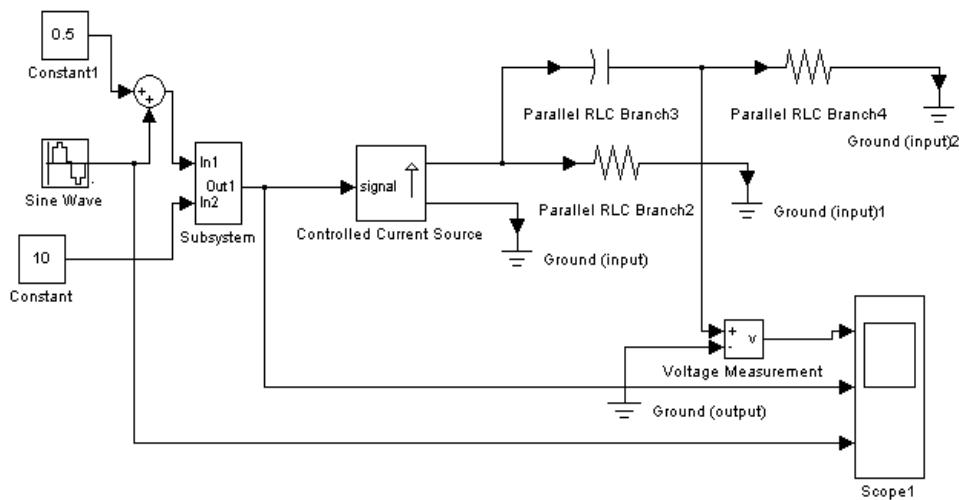


Рис. 7. Моделі транзисторного підсилювача, який побудовано за схемою із загальним емітером, створена у програмному комплексі Simulink

1. Напруга зміщення на базі та напруга живлення схеми задаються числовими константами у сигнальній моделі, а вхідний сигнал описується синусоїдальною залежністю [2, 3].

2. Модель транзистора, яку зображено на рис. 5, у цьому проекті, виконано у вигляді підсистеми. Це дозволяє зробити модель цього приладу досить універсальною, і її модель можна використовувати у різних проектах для різних типів транзисторів, змінюючи лише її параметри. Параметри моделі транзистора змінюються досить просто — через діалогове вікно користувача [2, 3].

3. Модель вихідного каскаду підсилювача виконано у вигляді еквівалентної схеми, показаної на рис. 6.

4. Для переходу від інформаційно-сигнальних моделей до моделей електричних компонент як перехідну ланку використано модель джерела струму, що керується сигналом [2].

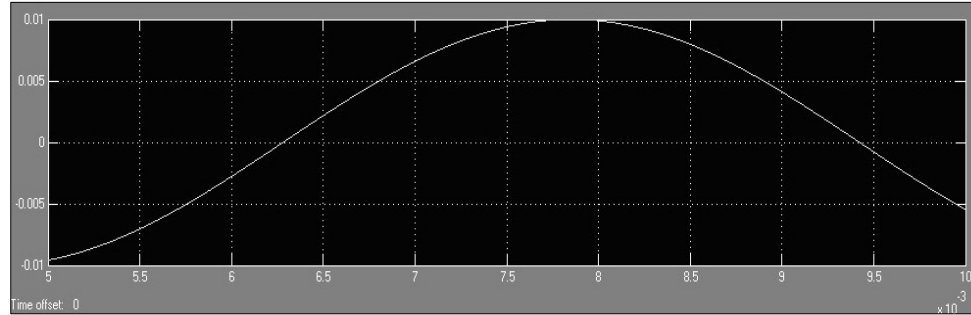
5. Для спостереження сигналів у різних вузлах схеми та аналізу результатів моделювання використано блок вольметра та блок осцилографа [2, 3].

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

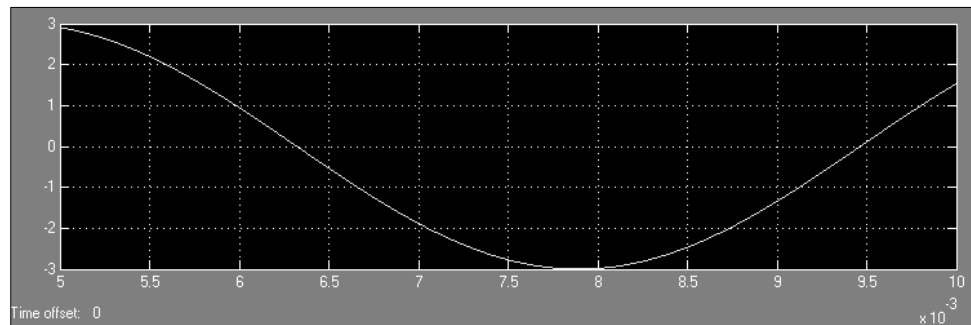
Результати моделювання транзисторного підсилювача подано на рис 8. Зрозуміло, що в обраному діапазоні робочої напруги немає спотворень сигналу, і в разі амплітуди вхідного сигналу 0,01 В напруга на виході підсилювача перевищує 2В. Зсув фази сигналу на виході зумовлено впливом ємності  $C_H$  та особливостями роботи підсилювача [5]. Розрахунки виконано для таких параметрів схеми:  $U_{жив} = 10\text{ В}$ ,  $R_1 = 100\text{ Ом}$ ;  $R_2 = 1,9\text{ Ом}$ ;  $R_3 = 400\text{ Ом}$ ;  $R_4 = 600\text{ Ом}$ ;  $C_H = 1\text{ мкФ}$ ;  $R_H = 10\text{ кОм}$ .

Із прикладу, який розглянуто у роботі, зрозуміло, що моделі електронних схем, побудованих у програмному комплексі Simulink, мають низку

переваг порівняно із моделями, побудованими з використанням засобів схемотехнічних САПР. Головною з цих переваг є можливість ефективної побудови та використання у робочих проектах математичних моделей компонент електронних схем. У тих випадках, коли засоби математичних бібліотек Simulink є недостатніми, можна використовувати більш розширені математичні бібліотеки програмного комплексу MatLab [2, 3].



а



б

Рис. 8. Часові залежності для вхідного (а) та вихідного (б) сигналів для модельованого транзисторного підсилювача

Іншою важливою перевагою засобів моделювання програмного комплексу Simulink є можливість побудови ієрархічних моделей з використанням підсистем. Ця функція пакета Simulink значною мірою розширює можливості для моделювання складних систем, особливо з урахуванням того, що внутрішні параметри моделей електронних компонент можна змінювати з використанням графічного інтерфейсу користувача.

Крім цього, можна користуватися готовими моделями електричних компонент бібліотеки SimPowerSystems [2–3]. У цьому разі для узгодження інформаційних моделей та моделей електричних сигналів використовуються моделі джерела напруги, керованого сигналом, та джерела струму, керованого сигналом [3, 4]. Моделі, які побудовано з використанням засобів візуального програмування програмного комплексу Simulink, є досить простими та зрозумілими для будь-якого інженера-проектувальника. У них вдало поєднано використання розвинутого математичного апарату, системний підхід і засоби моделювання електричних та електронних схем. Особливо ефективним є використання засобів моделювання програмного комплексу Simulink у разі проектування сучасних складних багатофункціональних електронних схем. Під час створення таких моделей необхідно об'єднувати описання

законів функціонування електронних схем та логічних алгоритмів, яким підпорядковується їх робота у складі системи. Зокрема, саме такий підхід до моделювання є дуже ефективним для описання роботи електронних пристроїв, побудованих на базі мікропроцесорів та мікроконтролерів.

## **ВИСНОВКИ**

Розглянуті у цій роботі на прикладі моделювання транзисторного підсилювача засоби проектування електронних схем програмного комплексу Simulink є досить простими та універсальними. Основними їх перевагами є розвинені математичні бібліотеки, можливість використання блочно-ієрархічного системного підходу, а також наявність великої бібліотеки компонент електричних та електронних схем. Для побудови складних математичних моделей електронних компонент можна користуватися математичними бібліотеками та засобами програмування системи науково-технічних розрахунків MatLab, яка разом із Simulink є єдиним програмним комплексом. Засоби моделювання програмного комплексу Simulink досить прості та зрозумілі для інженерів-проектувальників, оскільки їх побудовано за технологією та методами візуального програмування. Для моделювання роботи цифрових схем у Simulink існують окремі бібліотеки. Особливо ефективним є використання програмного комплексу Simulink для проектування складних сучасних електронних схем із програмованою логікою, зокрема мікропроцесорних та мікроконтролерних систем.

## **ЛІТЕРАТУРА**

1. *Разевиг В.Д.* Система проектирования OrCAD 9.2 / В.Д. Разевиг — М.: Солон – Пресс, 2003. — 528 с.
2. *Дьяконов В.П.* Simulink 5/6/7: Самоучитель / В.П. Дьяконов. — М.: ДМК – Пресс, 2008. — 784 с.
3. *Дьяконов В.П.* MatLab 6/6.1/6.5 Simulink 4/5. Основы применения / В.П. Дьяконов. — М.: Солон – Пресс, 2002. — 768 с.
4. *Дьяконов В.П.* MatLab и Simulink в электроэнергетике: справ. / В.П. Дьяконов, А.А. Пеньков. — М.: Горячая линия, Телеком. — 2009. — 816 с.
5. *Тицше У.* Полупроводниковая схемотехника / У. Тицше, К. Шенк. — М.: Мир, 1982. — 736 с.
6. *Автоматизация проектирования БИС: практ. пособие.* — В 6 кн. Книга 5. Физико-топологическое моделирование структур элементов БИС / В.Я. Кремлёв под ред. Г.Г. Казеннова. — М.: Высш. шк., 1990. — 144 с.
7. *Транзисторы для аппаратуры широкого применения: справ.* / К.М. Брежнева, Е.И. Гантман, Т.И. Давыдова, Г.Г. Коровин; под ред. Б.Л. Перельмана. — М.: Радио и связь, 1981. — 656 с.

*Надійшла 25.11.2014*