УДК 681.3.06

МАКАРЕНКО В. В.,
кандидат технічних наук, доцент кафедри звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

СПІВАК В. М.,
кандидат технічних наук, доцент кафедри звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

ВИКОРИСТАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПОЯСНЕННЯ ПРОЦЕСІВ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ У ПІДСИЛЮВАЧАХ ПОТУЖНОСТІ

У статті аналізується роль імітаційного моделювання під час навчання електронним спеціальностям у ВНЗ. Обґрунтовується вибір програмного середовища NIMultisim для проведення моделювання як з точки зору функціональних можливостей, так і з огляду на те, що програма безкоштовна. На прикладі аналізу вихідних каскадів підсилювачів звукової частоти показано як за допомогою програми моделювання пояснити фізичні процеси, що відбуваються у електричних колах цих підсилювачів та пояснити їх вплив на якісні показники підсилювачів.

Ключові слова: *імітаційне моделювання, spice-симулятор, програмні засоби, підсилювач, режим роботи, якісні показники.*

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку суспільства важливим завданням вищої освіти з підготовки фахівців у галузі електроніки є не тільки навчання студентів використанню готових рішень, але й розвиток у них творчих навичок. Для того, щоб успішно вирішувати такі задачі, важливо розуміти фізичні особливості процесів, що протікають в електронних колах. Використання програмних засобів для пояснення процесів, що відбуваються в електронних пристроях, дозволяє прослідкувати їх роботу у динамічному режимі, тобто спостерігати реакцію цих пристроїв на зміну різних параметрів, а отже і пояснити фізичну сутність процесів, що протікають у них. Окрім цього, можна формувати індивідуальні завдання для кожного студента з можливістю самоконтролю виконаних завдань.

Аналіз останніх публікацій. Аналіз проблематики конференцій останніх років та публікацій у різних виданнях [1-4] показує, що при вивченні дисциплін з електроніки, а саме цифрової та аналогової схемотехніки, все ширше застосовується використання spice-симуляторів, а саме Multisim. За даними розробника цього програмного продукту компанії National Instruments, його використовують у навчальному процесі такі університети Сполучених Штатів Америки, як Технічний університет штату Техас, Масачусетський технологічний інститут та багато ВНЗ у інших країнах світу.

Система схемотехнічного моделювання Multisim призначена для аналізу електричних та електромеханічних схем. Робота в реальній лабораторії вимагає великих часових втрат на підготовку експерименту. Multisim – це електронна лабораторія, яка дозволяє зробити вивчення електричних схем більш доступним. Помилки при експериментах в реальній лабораторії можуть призвести до значних матеріальних втрат, а при роботі з програмою студенти застраховані від того, що прилади чи пристрої під час експерименту вийдуть з ладу – програма повідомить про помилку моделювання і запропонує допомогу у вирішенні проблеми.

Метою статті є висвітлення підходів до моделювання електронних пристроїв та

обґрунтування доцільності використання spice-симуляторів для пояснення фізичних процесів, що відбуваються у складних електричних колах при їх вивченні у технічних ВНЗ.

Виклад основного матеріалу. Математичні програми, наприклад Matlab, надають широкі можливості з аналізу різноманітних пристроїв та систем, але потребують високої кваліфікації від користувача. До того ж використання таких програм для аналізу електронних пристроїв ускладняється тим, що для кожного з пристроїв, що використовується, необхідно формулювати математичну модель, що призводить до значних витрат часу при роботі з такими програмами. У той же час інженери, що займаються розробкою електронних пристроїв, у своїй практиці найчастіше використовують spice-симулятори. Зручний для користувачів інтерфейс програми Multisim надає можливість швидко освоїти роботу з цією програмою. Однак потрібно враховувати деякі особливості моделювання при використанні цієї чи аналогічних програм.

При виборі програм моделювання в першу чергу звертають увагу на можливості програми, її вартість та наявність технічної документації з прикладами використання. І хоча існує біля двох десятків безкоштовних програм spice-симуляторів, починаючий користувач однозначно вибере програму з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом. Саме такою є програма Multisim від компанії National Instruments. Серед релізів програми була випущена абсолютно безкоштовна версія NI Multisim Analog Devices Edition (10 версія програми), що повністю зберігає функціональність платної версії програми і має лише одне обмеження – не більше 25 елементів в одній схемі. Цього достатньо практично у всіх випадках при вивченні дисциплін електронного профілю для пояснення тих процесів, що відбуваються в електронних пристроях.

Наявність елементної бази з великою кількістю компонентів, що містить інтегральні мікросхеми та напівпровідникові пристрої, пасивні та електромеханічні компоненти, дозволяє проектувати і здійснювати аналіз роботи як аналогових, так і цифрових пристроїв.

Аналіз роботи пристроїв забезпечується цілим набором віртуальних вимірювальних пристроїв: багатоканальних осцилографів, Боде-плотера, аналізатора спектру, логічного аналізатора і багатьох інших [1; 4]. Окрім того, можна здійснювати аналіз роботи за постійним та змінним струмами, швидке перетворення Фур'є, аналіз перехідних процесів та ін.

Розглянемо застосування імітаційного моделювання для пояснення фізичних процесів, що відбуваються в вихідних каскадах підсилювачів потужності. Основними режимами роботи високоякісних підсилювачів низької частоти є режими А та АВ. Хоча у підсилювачах мобільних пристроїв та в автомобільних мультимедійних системах використовують ключові підсилювачі, вони працюють за зовсім іншими принципами і у межах даної статі не розглядаються.

Для цього скористаємось найпростішою схемою двотактного вихідного каскаду, що наведена на рис. 1.

Вихідний каскад (рис. 1) побудовано на двох транзисторах Q1 та Q2 різної провідності. Дільник напруги на резисторах R3 та R4 забезпечує режим роботи по постійному струму. Оскільки бази транзисторів Q1 таQ2 з'єднані між собою, то постійний струм при відсутності сигналу у точці з'єднання конденсатора C1 з базами транзисторів через колектори транзисторів не протікає. Для відкриття транзисторів необхідно, щоб на базі транзистора по відношенню до його емітера була позитивна напруга приблизно 0,7 В (залежить від типу транзистора та режиму його роботи). Для контролю напруги на базах та на емітерах транзисторів використовуються пробники Probe1 та Probe2, а для контролю струму колекторів використані давачі струму XCP1 та

XCP2.

Операційний підсилювач U1A виконує роль попереднього підсилювача, а вхідний сигнал формується генератором гармонічної напруги V3. Живлення підсилювача здійснюється від джерела двополярного живлення що виконане на генераторах V1 та V2.

Сутність першого експерименту полягає в демонстрації спотворень типу сходинка, що утворюються при роботі підсилювача в режимі класу В. На рисунку 2, а наведені осцилограми вхідного (верхній) та вихідного сигналів підсилювача та струми колекторів вихідних транзисторів (рис. 2, б).

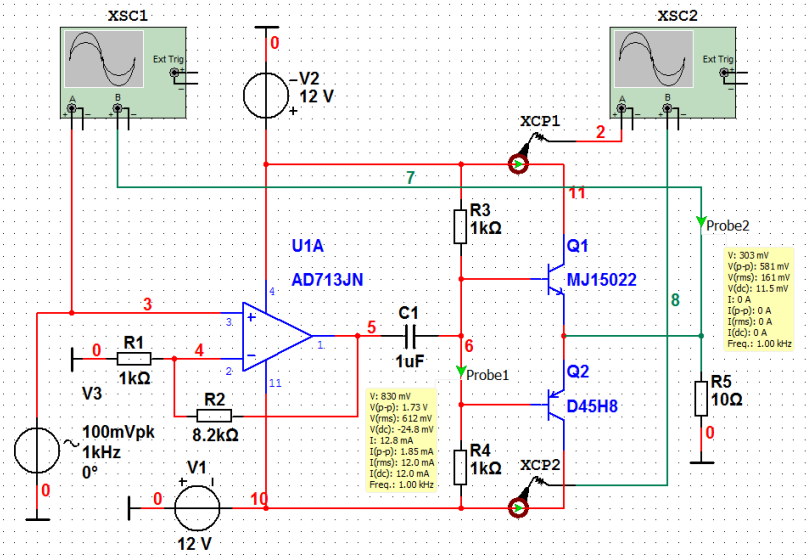
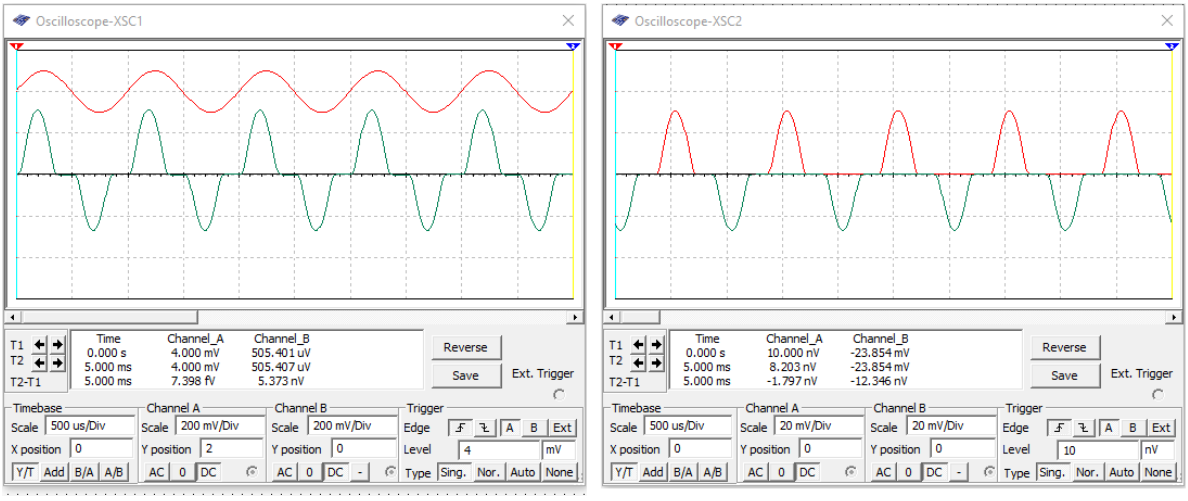


Рис. 1. Модель підсилювача потужності, що працює в режимі класу В



а) *б)*

Рис. 2. Осцилограми вхідної (верхня) та вихідної напруги (а) та струмів колекторів транзистора Q1 (верхня) та Q2 (б)

Тепер можна пояснити, чому утворюється сходинка у вихідному сигналі підсилювача. З рисунка 2,б витікає, що є проміжки часу, де струм не протікає через жоден транзистор і, відповідно, на виході підсилювача у ці інтервали часу формується нульова напруга. Коефіцієнт гармонік такого сигналу дуже значний і навіть нема необхідності його вимірювати.

Для ілюстрації того, як впливає початковий струм колектора на режим роботи

вихідного каскаду і на коефіцієнт гармонік, використовується схема, наведена на рис. 3. У схему додані діоди D1 та D2 і змінний резистор R6. Діоди обмежують максимальну напругу на базах транзисторів Q1 та Q2, а змінний резистор дозволяє регулювати напругу між базами транзисторів у широкому діапазоні. Контроль струмів вихідних транзисторів здійснюється, як і на рисунку 1, за допомогою давачів струму.

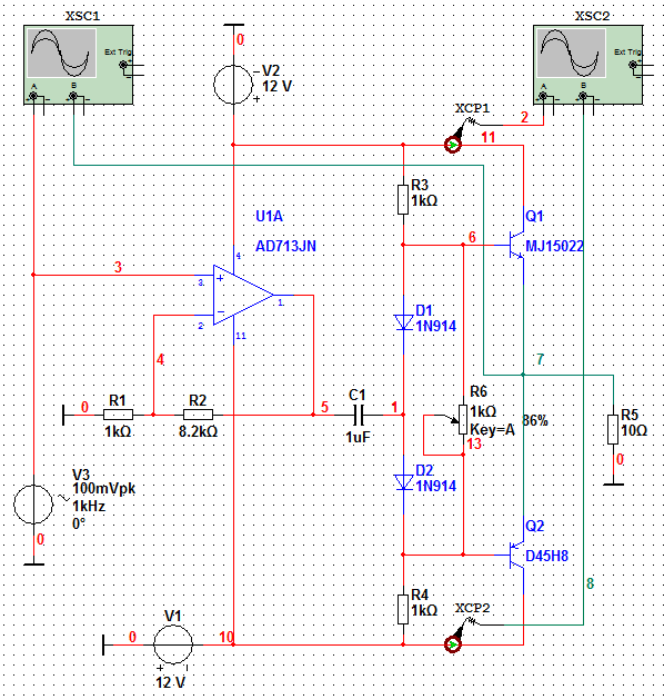
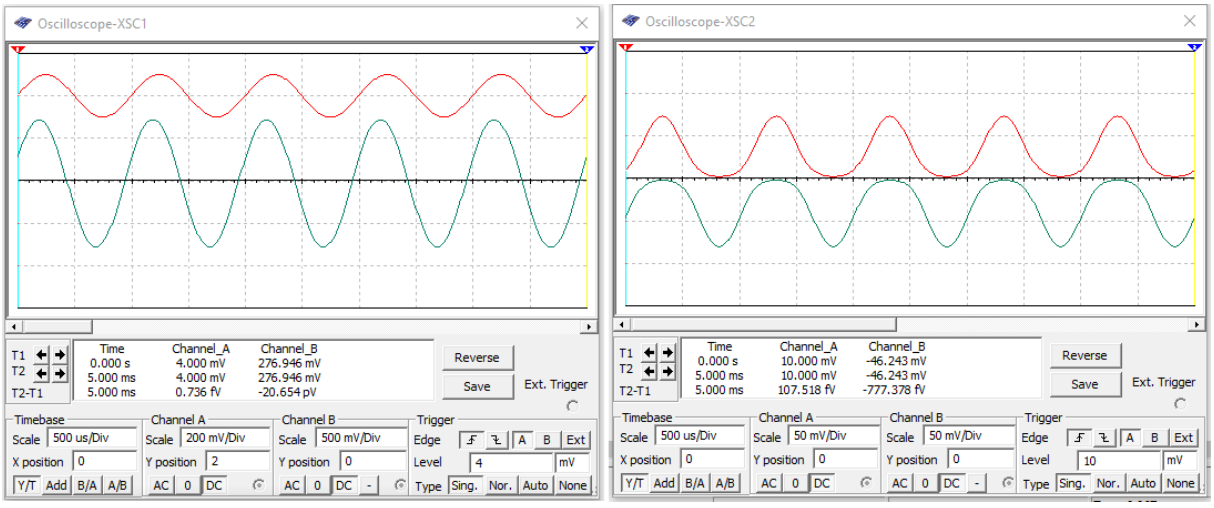


Рис. 3. Схема підсилювача з регульованим початковим струмом колектора

Для ілюстрації впливу початкового струму (струму спокою) колекторів на коефіцієнт гармонік встановимо його на рівні приблизно 20 мА (рис. 4, б). З осцилограм на рисунку 4, б видно, що транзистори працюють у нелінійному режимі (нижня напівхвиля струму сплощена). Однак сигнал, що формується на виході (рис. 4,а) візуально виглядає дуже схожим на синусоїду.



а) *б)*

Рис. 4. Осцилограми вхідної (верхня) та вихідної напруги (а) та струмів колекторів транзистора Q1 (верхня) та Q2 (б) при струмі спокою 20 мА

Виконавши швидке перетворення Фур'є, отримаємо спектр вихідного сигналу і

розрахований коефіцієнт гармонік підсилювача (рис. 5). І хоча форма вихідного сигналу на екрані осцилографа не дає можливості оцінити спотворення що внесені підсилювачем, спектральний аналіз дозволяє це зробити. Коефіцієнт гармонік при початковому струмі 20 мА не перевищує 0,67 %.

Такий режим роботи транзисторів називається АВ, близький до В. Прослідкуємо як впливає величина струму спокою на форму струму та на коефіцієнт гармонік. Для цього змінюючи опір резистора R6 встановимо струм спокою 75 мА (режим АВ близький до А). Осцилограми струмів вихідних транзисторів у цьому режимі наведені на рис. 6, а спектр сигналу на виході підсилювача – на рисунку 7.

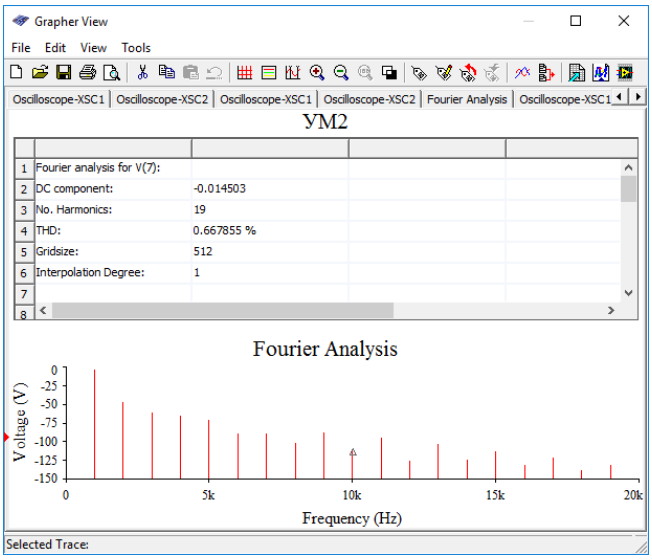


Рис. 5. Результати Фур'є аналізу сигналу на виході підсилювача при струмі спокою 20 мА

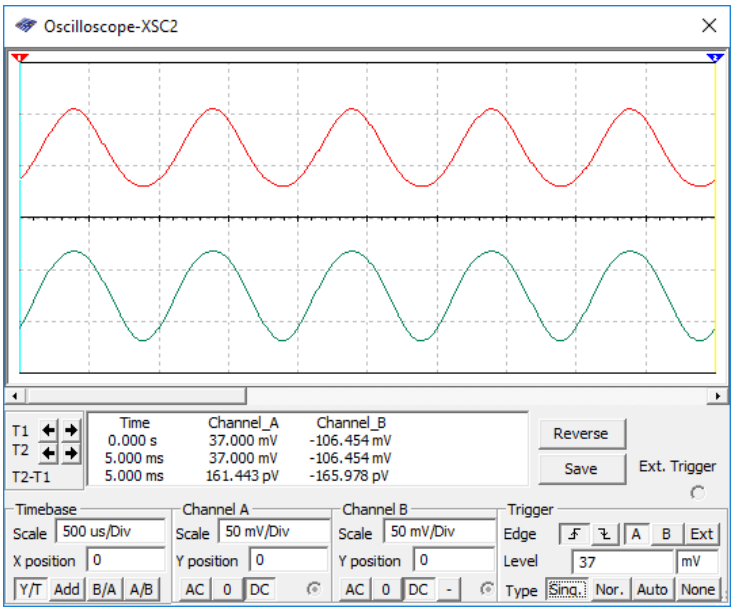


Рис. 6. Осцилограми струмів колекторів транзистора Q1 (верхня) та Q2 при струмі спокою 75 мА

Візуально ще помітна деяка нелінійність струмів при їх зменшенні, але оцінити це візуально неможливо. А результати Фур'є-аналізу показують що коефіцієнт гармонік зменшився у порівнянні з попереднім експериментом майже у десять разів і не

перевищує 0,079 %.

Отже помітна тенденція зменшення нелінійних спотворень при збільшенні струму спокою вихідних транзисторів. Залишилось провести експеримент з підсилювачем у режимі класу А. Відомо що струм спокою в такому режимі повинен дорівнювати амплітуді вихідного струму підсилювача при максимальні потужності. При напрузі живлення ±12 В амплітуда сигналу на виході підсилювача не буде перевищувати 10 В, а струм при опорі навантаження 10 Ом – 1 А. Схема наведена на рис. 2 дозволяє встановити максимальний струм спокою 300 мА, що достатньо для відслідковування закономірності. Спектр вихідного сигналу при струмі спокою 300 мА наведений на рис. 8, а виміряний коефіцієнт гармонік складає 0,02 %.

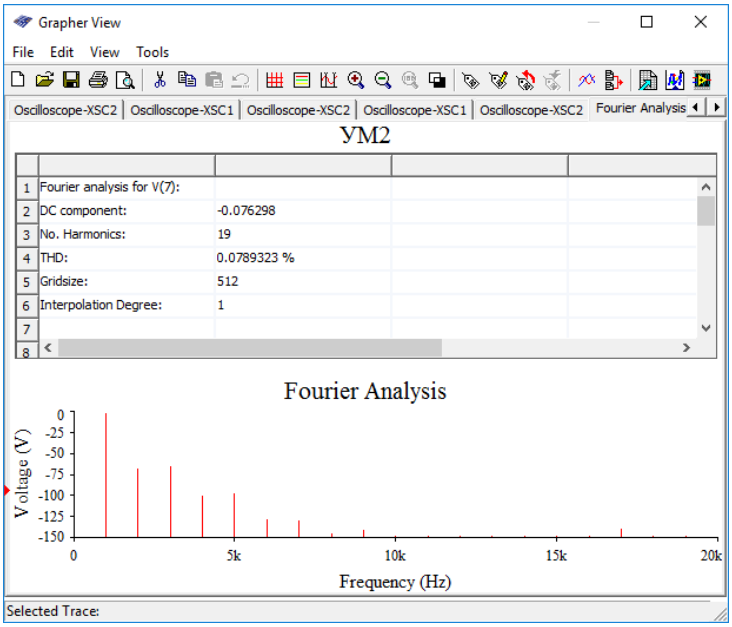


Рис. 7. Результати Фур'є-аналізу сигналу на виході підсилювача при струмі спокою 75 мА

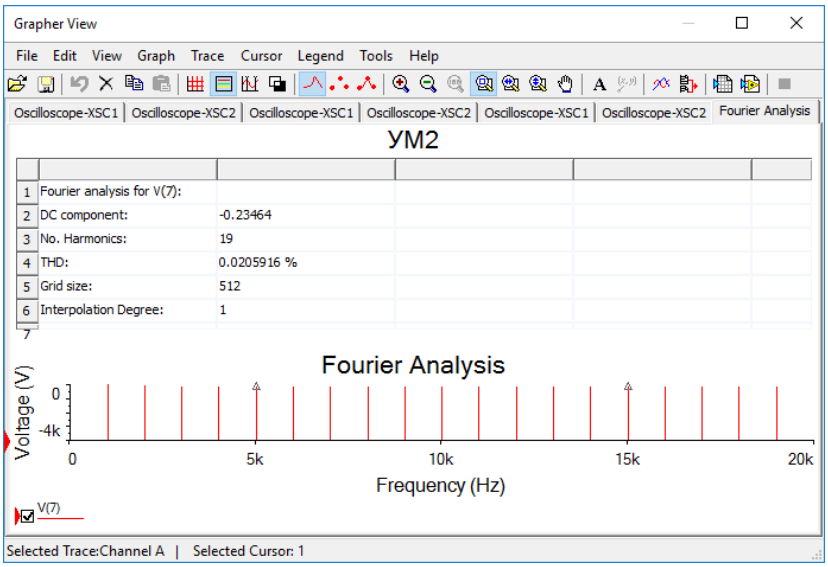


Рис. 7. Результати Фур'є-аналізу сигналу на виході підсилювача при струмі спокою 300 мА

Отже, експериментальні дослідження на таких моделях надають можливість

досліджувати вплив параметри схеми на її характеристики.

Висновки. Використовуючи програми імітаційного моделювання можна відслідкувати вплив параметрів режимів роботи та характеристик елементів схеми на характеристики вихідного сигналу. Це дозволяє пояснити як той чи інший параметр впливає на кінцевий результат. У розглянутих прикладах за кінцевий результат був прийнятий коефіцієнт гармонік, а параметр від якого залежить його величина – струм спокою вихідних транзисторів підсилювача. Наведені осцилограми дозволяють як візуально оцінити форму сигналу, так і оцінити склад спектру вихідного коливання. Отримані дані дають можливість пояснити і інші властивості такого підсилювача, наприклад, склад спектру вихідного сигналу. Отже, використання програми NI Multisim для пояснень процесів що відбуваються в електричних колах, дозволяє значно покращити наочність теоретичних положень.

Список використаної літератури

1. Макаренко В. В. Моделирование радиоэлектронных устройств с помощью программы NIMultisim [Электронный ресурс] // Электронный журнал «Радиоежегодник». – 2013. – Выпуск : апрель (23). – С. 141-267. – Режим доступа : http://www.rlocman.ru.
2. Виртуальная лаборатория по измерительным приборам в среде Multisim и методика ее использования / Сост. Погодин Д. В., Насырова Р. Г. – Казань : Казан. гос. техн. ун-т им. А. Н. Туполева, 2011. – 35 с.
3. Wang G. Principles and Practices: Multisim in Teaching Digital Systems Design / G. Wang // Proceedings of 2006 ASEE Annual Conference and Exposition, Session, Illinois-Indiana and North Central Joint Section.
4. Макаренко В. В. Цифрова та імпульсна схемотехніка. Моделювання та аналіз : навчальний посібник / Макаренко В. В., Співак В. М. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – 314 с., іл.

References

1. Makarenko V. V. (2013). Modelirovanie radiojelektronny hustrojstv s pomoshh'ju programmy NIMultisim. *Radioezhegodnik* (*Radioannual*). April (23), 141-267. Retrieved from http://www.rlocman.ru.
2. Pogodin, D. V., Nasyrova, R. G. (Ed.) (2011). *Virtual'naja laboratorija po izmeritel'nym priboram v srede Multisim i metodika ee ispol'zovanija*. Kazan', Kazan. gos. tehn. un-t im. A. N. Tupoleva, 35 p.
3. Wang, G. (2006). *Principles and Practices: Multisim in Teaching Digital Systems Design*. Proceedings of 2006 ASEE Annual Conference and Exposition, Session, Illinois-Indiana and North Central Joint Section.
4. Makarenko, V. V., Spivak, V. M. (2015). *Cifrova ta impul'sna shemotehnika. Modeljuvannja ta analiz*. K., NTUU "KPI", 314 p.

MAKARENKO V.,
Doctor of Philosophy (Technical Sciences), Associate Professor of Audio Engineering and Information Registration Department, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»
SPIVAK V.,
Doctor of Philosophy (Technical Sciences), Associate Professor of Audio Engineering and Information Registration Department, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

USE OF SIMULATION MODELING TO EXPLAIN THE PROCESSES OCCURRING IN POWER AMPLIFIER

Abstract. Introduction*. The article analyzes the role of simulation in teaching electronic specialties in higher educational institutions. The selection of the software environment NI Multisim for modeling from the point of view of functionality, and given the fact that the program is free. By analyzing the output stages of audio frequency amplifiers is shown as using a simulation program to explain the physical processes in electrical circuits of these amplifiers and to explain their influence on the quality parameters of amplifiers.*

Purpose. *The purpose of this article is to highlight approaches to the modeling of electronic devices and justification of the feasibility of using spice simulation to explain the physical processes in complex electrical circuits in their studies in technical colleges.*

Methods. *As a method used simulation modeling using spice simulation of the processes occurring in the output stages of power amplifiers of sound frequency. Given the fact that the use of simulation provides an opportunity not only to demonstrate the processes in complex electrical circuits, but also to interpret their results. This enables a better understanding of physics of processes occurring in electronic circuits, without the use of expensive equipment.*

Results. *Described in the article models and approaches to the analysis of the obtained measurement results allow a deeper understanding of physics processes in complex electronic circuits. The use of the proposed models during lectures and practical training allows faster and practice to explain the operation of this device.*

Originality. *Originality of material is to use simulation to explain the principles of operation of the complex analog electronic devices that allows to form individual assignments of students to check their understanding of the processes occurring in such devices.*

Conclusion. *Using simulation programs, it is possible to trace the influence of parameters of modes of operation and characteristics of circuit elements on the characteristics of the output signal. This allows us to explain how a particular parameter affects the outcome. In the examples, the final result was adopted by the harmonic, and the parameter which determines its value is the quiescent current of the output transistors of the amplifier. Shown as waveforms allow to visually assess the shape of the signal and to estimate the composition of the spectrum of the output oscillations. The obtained data enable to explain and other properties of this amplifier, for example, the composition of the spectrum of the output signal. Consequently, the use of the program Multisim NI for explanations of processes occurring in electrical circuits, can significantly improve the visibility of theoretical positions.*

Keywords: *simulation, spice simulator, software, power, mode of operation, quality indicators.*

Одержано редакцією 25.03.2016 р.
Прийнято до публікації 01.04.2016 р.