УДК 621.373.1

С.М. ЦИРУЛЬНИК, В.А. ВОЗНЮК, В.С. БУЗІН
Вінницький технічний коледж, Вінницький національний технічний університет

БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ГЕНЕРАТОР СИГНАЛІВ

У статті розглядаються практичні аспекти побудови багатофункціонального генератора сигналів на основі спеціалізованої мікросхеми MAX038. Наводиться структурно-функціональна схема генератора, таблиця розрахунку елементів схеми для зміни частотного діапазону , основні форми сигналів, що формує генератор та практична схема. Представлена конструкція генератора сигналу та особливості роботи з ним.

Ключові слова: багатофункціональний генератор, інтегратор, операційний підсилювач.

S.M. TSYRULNYK, V.A. VOZNIUK, V.S. BUZIN
Vinnitsa Technical College, Vinnitsa National Technical University

MULTIFUNCTIONAL SIGNAL GENERATOR

The article deals with the practical aspects of building a multifunctional signal generator based on a specialized chip MAX038. We give the structural and functional scheme generator, table calculation circuit elements to change the frequency range, the main parameters, which forms generator and practical scheme. The presented design of signal generator and features with it. Difficulties in building functional generators occur when you increase the maximum oscillation frequency from one to tens of MHz. Only with the development of new generations of integrated broadband amplifiers and specialized integrated circuits functional generators have an opportunity to create a small device with a maximum frequency, reaching tens of MHz.

Keywords: multi-function generator, integrator, operational amplifier.

Вступ

Функціональними генераторами прийнято називати генератори декількох функціональних сигналів, наприклад, прямокутних, трикутних та синусоїдальних. Різноманітність форм сигналів розширює сфери застосування таких генераторів і дозволяє використовувати їх для тестування, налагодження та дослідження найрізноманітнішої електронної апаратури. На відміну від RC та LC генераторів функціональні генератори є більш широкодіапазонні – відношення максимальної частоти генерації до мінімальної у них має порядок 10^5 – 10^6 та вище. Найбільш часто функціональні генератори використовуються при налагодженні високочастотних (ВЧ), низькочастотних (НЧ) та наднизькочастотних пристроїв.

Актуальність

Спеціалізовані лабораторії Вінницького технічного коледжу, Вінницького національного технічного університету вимагають застосування генераторів аналогових сигналів різного частотного діапазону під час навчального процесу. Застосування приладів, які є в наявності не задовольняють потреби лабораторій. По-перше, ці прилади знаходяться в експлуатації більше 20 років. Ефективність їх роботи невисока. Частина з них не працює, а ремонту вони не підлягають, так як відсутня елементна база для їх ремонту; друга частина працює, однак, параметри їх за рахунок старіння радіоелементів вийшли за паспортні дані. Покращити ситуацію можна двома способами. По-перше, можна придбати нові прилади, але вартість їх перевищує фінансові можливості навчального закладу. Другим способом є розробка та виготовлення вимірювальних приладів на сучасній елементній базі власними силами.

Постановка задачі

Необхідно провести аналіз принципів побудови функціональних генераторів з метою визначення складових відносної похибки встановлення частоти та коефіцієнта гармонік та врахувати їх для реалізації практичної конструкції багатофункціонального генератора з параметрами: частота 10 Гц – 10 МГц, форма коливань: синусоїдальна, прямокутна, трикутна; амплітуда вихідних сигналів не менша 1,5 В.

Розв'язання задачі

Функціональні генератори діляться на два широких класи:

- аналогові функціональні генератори на основі інтегратора аналогових сигналів у вигляді прямокутних імпульсів (меандру);
- цифрові функціональні генератори на основі дискретних (цифрових) інтеграторів.

Крім простоти реалізації, аналогові функціональні генератори мають одну незаперечну перевагу перед цифровими генераторами – відсутність сходинок на ділянках зростання та спаду пилоподібної та синусоїдальної вихідної напруги. Принцип побудови функціональних генераторів на основі інтегратора пояснює рис. 1. Основою генератора є інтегратор, побудований на інтегральному операційному підсилювачі ОП, та ключовий каскад (К) (рис. 1, *а*). Ключ має гістерезисну передавальну характеристику, яка показана на рис. 1, *б*. При наростанні напруги, що лінійно змінюється, з виходу інтегратора ключ перемикається (напруга на виході падає з $U_2 > 0$ до $U_1 < 0$), що веде до зміни напрямку інтегрування інтегратора. Напруга на його виході спадає і коли вона буде нижче рівня U_1 ключ знову спрацьовує, і напруга на його виході стає рівною $U_2 > 0$ (рис. 1, *г*). Напрямок інтегрування знову змінюється, і процеси повторюються. В результаті на виході І виникає сигнал трикутної форми, а на виході К – прямокутної (рис. 1, *б*). Сигнал синусоїдальної форми U_3 виникає на виході перетворювача (Пр) (рис. 1, *в*).

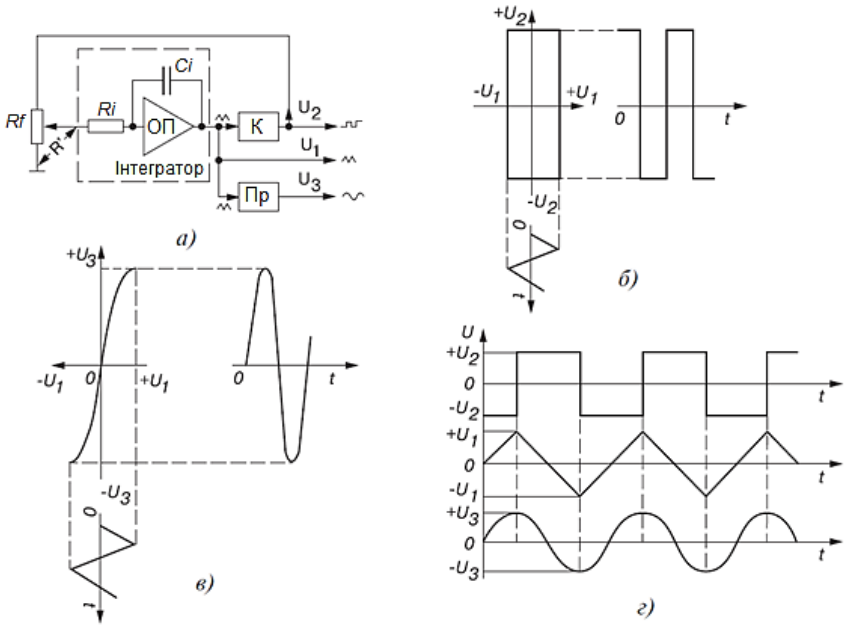

Рис. 1. Блок-схема функціонального генератора (а) та діаграми, що характеризують його роботу: перемикання ключа (б), перетворення трикутної напруги в синусоїдальну (в) та форми вихідних сигналів (г)

Коефіцієнт передавання напруги

$$K_Д = R'/R_f,$$

де R' – частина резистора R_f, з якого сигнал К подається на І.

Якщо петля гістерезису К симетрична (рис. 1.1, б), то частота коливань дорівнює

$$f = K_Д U_2/4RiCiU_1,$$

де $RiCi$ – постійна часу інтегратора, U_2 – рівень вихідного сигналу К, U_1 – поріг спрацьовування К.

Дискретна зміна частоти виконується перемиканням елементів $RiCi$ інтегратора, а плавна – потенціометром R_f. Вихідні сигнали ФГ поступають на перемикач форми вихідного сигналу, потенціометр регулювання амплітуди, вихідний підсилювач та атенюатор.

Частота сигналу ФГ (рис. 1, а) визначається вхідним струмом інтегратора протягом дії зарядного імпульсу, причому як значення та напрямок струму, так й час його протікання задаються безпосередньо двополярним сигналом прямокутної форми К. Якщо кола керування струмом та часом його протікання розв'язати, то частоту ФГ можна змінювати регулюванням значення зарядного струму електронним способом. Генератор, що керується напругою (ФГ-ГКН), наведений на рис. 2.

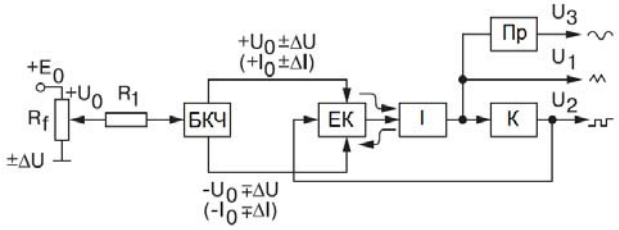

Рис. 2. Структурна схема функціонального генератора, що керується напругою

До складу ФГ-ГКН, як і ФГ, входить інтегратор І та ключовий елемент К. Автоколивальне кільце замикається через електронний перемикач (ЕК). Сигнал з К тільки керує ЕК, а на вхід інтегратора через ЕК по черзі подаються різнополярні зарядні струми, джерела яких розташовані у блоці керування частотою (БКЧ). У свою чергу, БКЧ керується напругою постійного струму U_0. Час заряду та розряду конденсатора струмами *Із* та *Ір* дорівнюють:

$$t_3 = 2CUm/I_3;\ t_P = 2CUm/I_P.$$

Для випадку генерації симетричних коливань

$$T_0 = t_3 + t_P = 4CUm/I;\ f_0 = 1/T_0 = I/4CUm = U_0/4RiCiU_1.$$

Електронний перемикач реалізовується як мостова схема на діодах Шотки. Блок керування частотою може бути реалізований як перетворювач напруги в напругу (БКЧ-ПНН) і як перетворювач напруги в струм (БКЧ-ПНС). У схемі БКЧ-ПНН електронний комутатор на основі діодного моста підключається до входу інтегратора на операційному підсилювачі з 100% ємнісним зворотнім зв'язком. У схемі БКЧ-ПНТ як інтегратор використовується конденсатор *Ci* з однією заземленою обкладкою. Для

зняття з конденсатора пилкоподібної напруги застосовують буферний підсилювач (БП) (рис. 3). Дослідження, що проведені в [4] показують, що схеми з БКЧ-ПНС мають менші спотворення вершини трикутних імпульсів і на порядок вищу максимальну частоту генерації, тому їх застосовують, коли fmax >10 МГц.

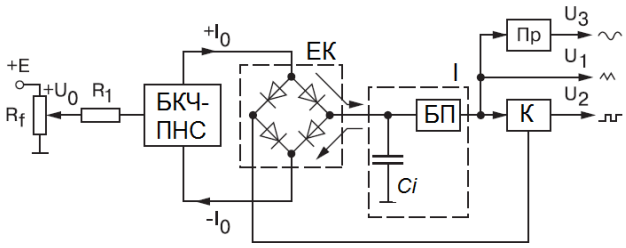

Рис. 3. Блок схема функціонального генератора зі струмом, що переключається, на вході інтегратора-конденсатора

Аналіз впливу не ідеальність основних вузлів схеми на його характеристики показує, що відносна похибка частоти, що вноситься операційним підсилювачем (ОП) складає:

$$\delta fi = -\frac{U_1}{U_O K_{ОП}}\left(1+\frac{K_{ОП}Ri}{Rb}+\frac{Ri}{Rbx}\right)-\frac{2T_{ОП}}{T'_{ID}K_{ОП}}\left(1+\frac{Cbx}{Ci}\right),$$

де U_1 – амплітуда сигналу трикутної форми; U_0 – напруга на виході БКЧ; $K_{ОП}$ – коефіцієнт підсилення ОП без зворотного зв'язку; *Ri, Ci* – елементи інтегратора; *Rb* – опір витоку конденсатора *Ci; Rbx, Cbx* – вхідний опір та ємність ОП; T'_{ID} – період коливань у ФГ з ідеальним інтегратором; $T_{ОП}$ – постійна часу ОП.

Перша складова відносної похибки суттєва на низьких частотах, а друга – на високих частотах. Вихідний опір ОП практично не впливає на похибку інтегрування, однак від нього залежить форма вихідного сигналу. Дрейф нуля ОП викликає незначну похибку інтегрування, але суттєво впливає на рівність тривалості півхвиль сигналу. У верхній частині частотного діапазону ФГ-ГКН спостерігається похибка частоти через не ідеальність К. Час спрацьовування К є причиною запізнення вершини сигналу трикутної форми, завдяки чому зростає його амплітуда та знижується частота:

$$f_1 = 1/(T''_{ID}+4\tau_3),$$

де T''_{ID} –період коливань у ФГ з ідеальним К; τ_3 – запізнення вершини сигналу.

Відносна похибка частоти через не ідеальність К дорівнює:

$$\delta f_K = 4\tau_3/(T''_{ID}+4\tau_3) \approx 4\tau_3/T''_{ID}.$$

Ця похибка на високих частотах обумовлює додаткові спотворення синусоїдального сигналу, що формуються з трикутного. Тому вибір К з малим часом запізнення є однією з головних задач при розробці високочастотного ФГ.

Особливості побудови Пр наводяться в [2]. Основними умовами отримання мінімального Кг сигналу синусоїдальної форми є лінійність напруги трикутної форми, відсутність постійної складової, однакова тривалість напівхвиль та потрібна амплітуда. При нерівності тривалості півхвиль напруги трикутної форми у 1% викликає збільшення Кг на 0,4%, зміна амплітуди на 1% викликає збільшення Кг на 0,15%, а зміщення постійної складової на 1% (відносно амплітуди) збільшує Кг на 0,4%. Тому при реалізації практичної конструкції ФГ перераховані умови побудови перетворювача трикутник – синус мають бути враховані.

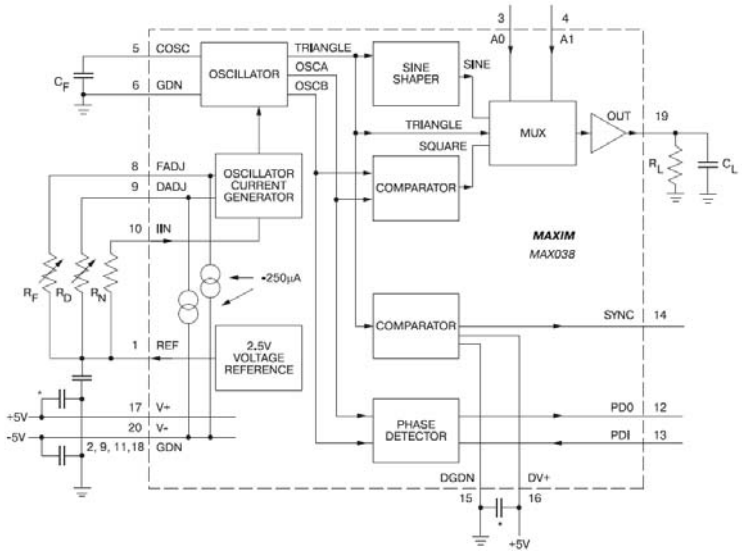

Рис. 4. Функціональна схема мікросхеми MAX038

Аналіз практичних конструкцій та елементної бази [3, 5, 6] з врахуванням зазначених вище рекомендацій показав, що найбільш перспективним є реалізація багатофункціонального генератора на ІМС MAX038 з параметрами [1, 2, 3]: частотний діапазон 0,1 Гц–20 МГц; Кг < 0,75%, вихідний опір – 0,1 Ом, амплітуда вихідного сигналу – 2 В.

Функціональна схема мікросхеми MAX038 наведена на рис. 4. Центральне місце займає генератор OSCILLATOR, робота якого заснована на заряді та розряді зовнішньої ємності C_F регульованим постійним струмом. Для цього служить джерело регульованого струму OSCILLATOR CURENT GENERATOR. Таке

рішення забезпечує заземлення однієї з обкладок конденсатора та дозволяє в широких межах плавно міняти частоту генератора зміною напруги керування. Крім того, при цьому забезпечено можливість регулювання симетрії (шпаруватості) імпульсів та маніпуляції. Застосування інтегратора на основі керованих джерел струму має деякі переваги перед інтегратором з ємнісний негативним зворотним зв'язком – більш високі частоти та менші спотворення верхівок трикутних коливань.

Для отримання синусоїдальної напруги застосований перетворювач SINE SHAPER, а для отримання прямокутної напруги – додатковий компаратор COMPARATOR. Комутатор MUX служить для вибору форми сигналу (синусоїдальної, трикутної або прямокутної), а буферний підсилювач – для підключення навантаження $R_L C_L$. Другий компаратор та фазовий детектор PHASE DETECTOR служать для створення сигналів синхронізації, які використовуються осцилографом при роботі з функціональним генератором. Частота генерації визначається за формулою:

$$f_0 = \frac{2 \times 2{,}5V}{R_N \times C_F}.$$

Якщо вибрати R_N змінним (рис. 4) та з'єднати з ним послідовно резистор 10 кОм, то R_N min=10 кОм, а R_N max=210 кОм. Таким чином можна зробити генератор з плавною зміною частоти в межах під діапазону.

Таблиця 1

Розрахунок частотного діапазону генератора

	I	II	III	IV	V	VI	VII
Fmin	1 Гц	10 Гц	100 Гц	1000 Гц	10 кГц	100 кГц	1 МГц
Fmax	20 Гц	200 Гц	2 кГц	20 кГц	200 кГц	2 МГц	20 МГц
C_F	22 мкФ	2,2 мкФ	220 нФ	22 нФ	2,2 нФ	220 пФ	22 пФ

Режим роботи генератора задається станом входів A1A0 MAX038: X1 – Sine wave, 00 – Square wave, 10 – Triangle wave.

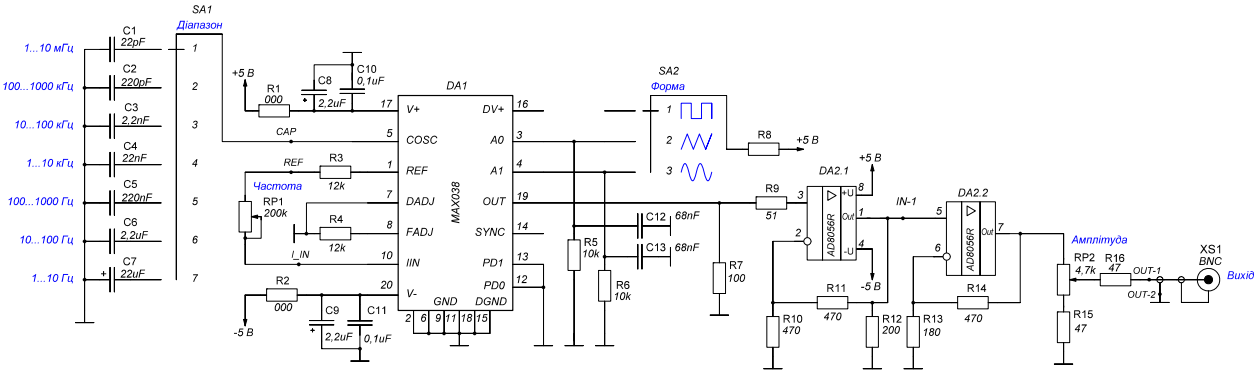

Рис. 5. Схема блоку формування частоти

На рис. 5 зображена схема блоку формування частоти та форми вихідного сигналу. Перемикач SA1 вибирає частотний діапазон: 1…10 Гц, 10…100 Гц, 100…1000 Гц, 1 кГц…10 кГц, 10…100 кГц, 100…1000 кГц, 1…10 МГц. Плавну зміну частоти в межах діапазону забезпечує RP1. Форма вихідного сигналу вибирається SA2. Особливістю IMC DA1 (MAX038), DA2 (AD8056R) є двох полярне живлення $\pm$ 5В. Вихідний сигнал з 19 виводу DA1 поступає на узгоджувальний каскад DA2.1 та лінійний підсилювач на DA2.2 (коефіцієнт підсилення 4), які реалізовані за схемами не інвертованих підсилювачів на IMC AD8056R. Вона представляє собою малошумлячий високочастотний (300 МГц) операційний підсилювач. Резистором RP2 регулюється амплітуда вихідного сигналу в межах 0 –1,5 В.

Практична конструкція генератора розроблена та виготовлена у Вінницькому технічному коледжі. Робота генератора була перевірена за допомогою осцилографа SIGLENT DS1102CA. На рис. 6–8 наведені основні форми сигналу, що виробляє генератор.

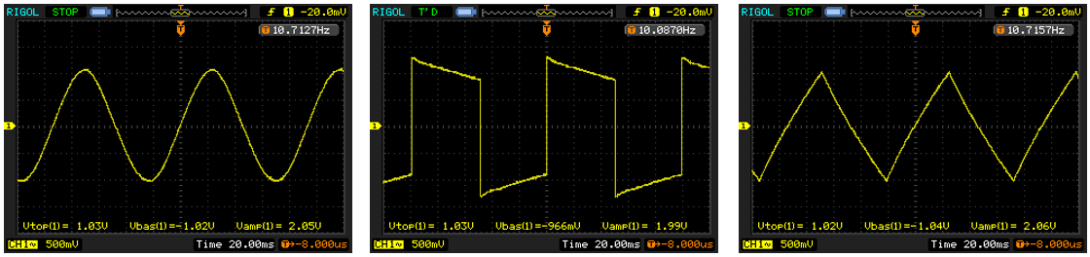

Рис. 6. Форма вихідних сигналів генератора в I під діапазоні (1–10 Гц)

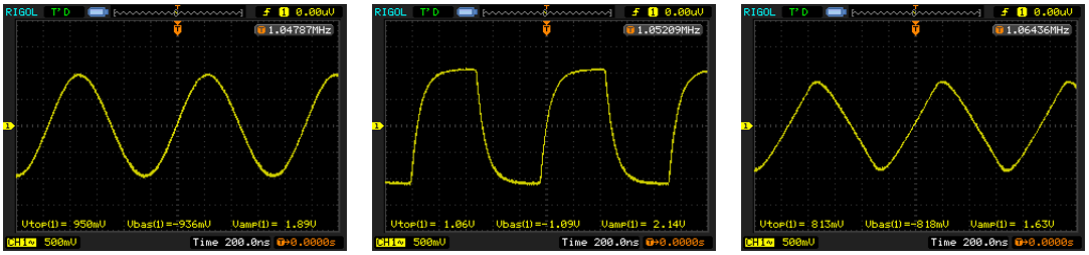

Рис. 7. Форма вихідних сигналів в VI під діапазоні (100–1000 кГц)

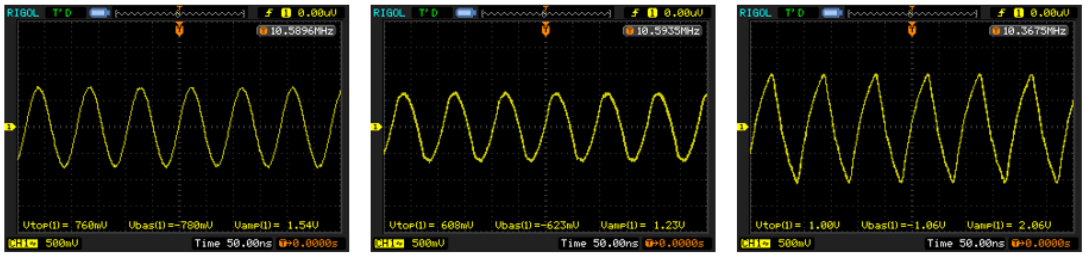

Рис. 8. Форма вихідних сигналів в VII під діапазоні (1–10 МГц)

Випробування показали, що Кг в діапазоні від 1 до 10 Гц має значення 1–2%, менше 0,5% в діапазоні від 10 Гц до 10 кГц, менше 0,75% в діапазоні 10…100 кГц, менше 1% в діапазоні 100 кГц…1 МГц, менше 1,5–2% в діапазоні вище 1 МГц. Значення Кг та частотний діапазон кращі за параметри промислових генераторів типу Г6-29, Г6-31, Г6-34, Г4-121. З врахуванням практичних задач, які виникають під час налагодження аналогової та цифрової техніки, багатофункціональний генератор повинний формувати сигнал синусоїдальної та прямокутної форми від 10 Гц до 10 МГц з максимальною амплітудою до 2,5В. Спотворення форми сигналів в межах 1–3% не впливають на кінцевий результат налагодження та діагностики різних функціональних блоків радіоелектронної апаратури. Наявність вихідного сигналу трикутної форми є необов'язковою, тому у запропонованому генераторі це може сприйматись як додаткові функціональні можливості.

Висновки

Труднощі у побудові функціональних генераторів виникають при збільшенні максимальної частоти генерації з одного до десятків МГц. Лише з розробкою нових поколінь інтегральних широкосмугових підсилювачів та спеціалізованих інтегральних мікросхем функціональних генераторів з'явилася можливість створення малогабаритних пристроїв з максимальними частотами, що досягають десятки МГц.

Запропонований багатофункціональний генератор посів І-місце у творчому конкурсу IV Всеукраїнської олімпіади з радіоелектроніки серед ВНЗ І-ІІ р.а. Генератор можна виготовити власними силами навчальним закладом і це дозволить покращити лабораторну базу та якісь підготовки фахівців з радіоелектроніки у вищих навчальних закладах України.

Література

1. MAX038. High-Frequency Waveform Generator [Електронний ресурс] // Datasheet. Rev. 2a; 9/96. – Maxim corp. – 16 p. – Режим доступу : http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX038.pdf, вільний. – Загл. з екрану.

2. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. — М. : ДМК Пресс, 2009. – 384 с. – ISBN 978-5-94074-493-1.

3. Матыкин А. Универсальный функциональный генератор /А. Матыкин // Радио. –1998. – № 5. – С. 34–36.

4. Ноткин Л. Р. Функциональные генераторы и их применение / Л. Р. Ноткин. – М. : Радио и связь, 1983. – 184 с.

5. Электронный портал Радиокот. Простой аналоговый функциональный генератор (0,1 Гц – 8 МГц) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://radiokot.ru/circuit/analog/generator/06.

6. Электронный портал Радиолюбитель. Собираем генератор сигналов. Часть 1 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://radio-stv.ru/generator-signalov-funktsionalnyiy-g.

References

1. MAX038. High-Frequency Waveform Generator [Elektronnyi resurs] // Datasheet. Rev. 2a; 9/96. – Maxim corp. – 16 p. – Rezhym dostupu: http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX038.pdf, vilnyi. – Zahl. z ekrana. – Mova eng.

2. Diakonov V. P. Heneratsyia and heneratory syhnalov / V. P. Diakonov. — M.: DMK Press, 2009. 384 p. – ISBN 978-5-94074-493-1.

3. Matykyn A. Unyversalnyi funktsyonalnyi henerator/A. Matykyn// Radio. – №5. –1998. – p. 34-36.

4. Notkyn L. R. Funktsyonalni heneratory ta yikh prymenenye/ L. R. Notkyn. – M.: Radyo y sviaz, 1983. – 184p.

5. Elektronnyi portal Radyokot / Prostoi analohovyi funktsyonalnyi henerator (0,1 Hts - 8 MHts) [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://radiokot.ru/circuit/analog/generator/06/, vilnyi. – Zahl. z ekrana. – Mova rus.

6. Elektronnyi portal Radyoliubytel / Sobyraem henerator syhnalov. Chast 1 [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://radio-stv.ru/generator-signalov-funktsionalnyiy-g, vilnyi. – Zahl. z ekrana. – Mova rus.

Рецензія/Peer review : 23.09.2014 р. Надрукована/Printed :29.11.2014 р.
Рецензент: д.т.н., професор В. М. Кичак