

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ КРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛІВ НА БАЗІ
ПК**

Студент гр. ЕІ-61

Чаус С.Р.

Науковий керівник,
к.т.н., ст. викладач

Васильєв В.І.

Нормоконтроль,
к.т.н., ст. викладач

Динник О.Д.

Конотоп 2020

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження дипломної роботи є сучасні схемотехнічні рішення розробки функціональних генераторів на базі ПК.

Мета роботи полягає у вивченні сучасних тенденцій розвитку інтегральної схемотехніки для створення сучасних радіовимірювальних приладів. Створення системи псевдосенсорного керування, використання матричних індикаторів.

При виконанні роботи використовувалися методи комп'ютерного проектування і моделювання елементів електронних систем та використання методів програмного керування аналоговими приладами через цифроаналогові пристрої для псевдосенсорного керування.

У результаті проведених досліджень встановлено, що сучасний розвиток компютеризації і програмного забезпечення дає можливості більш інтегрованого поєднання ПК з технологією виробництва. Наприклад, при створенні і налагодженні радіоелектронної апаратури

Робота викладена на 37 сторінках, у тому числі включає 20 рисунків, 5 таблиць, список цитованої літератури із 24 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: генератор, інтегральна мікросхема середньої степені інтеграції, псевдосенсорне керування, матричні індикатори, дешифратори, мультиплексори.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 СХЕМОТЕХНІКА СУЧАСНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ГЕНЕРАТОРІВ	5
1.1 Структурна схема і її модифікації.....	5
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА З ПСЕВДОСЕНСОРНИМ КЕРУВАННЯМ	15
2.1 Розробка структурних схеми функціонального генератору сигналів..	15
2.2 Розробка і розрахунки параметрів принципів схем.....	19
2.3 Розробка пристрою відображення.....	24
РОЗДІЛ 3 СУЧАСНІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ	29
3.1 Функціональні генератори, керовані напругою або струмом.....	29
3.2 Генератори сигналів довільної форми на базі ПК	31
ВИСНОВКИ	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36

ВСТУП

Для налагодження електронних приладів, пристроїв і систем необхідна якісна радіовимірвальна апаратура, до складу якої входять також генератори випробувальних сигналів. Вони вирішують велику кількість завдань, що включають в себе формування сигналів необхідної фізичної природи, полярності, частоти, форми, амплітуди. Таким чином генератор сигналів - це пристрій, що дозволяє отримувати сигнал певної природи (акустичний, електричний або інший), що має задані характеристики (форму, енергетичні або статистичні характеристики і т.п.). Генератори широко використовуються для вимірювань сигналів, для перетворення і в інших областях. Складається з джерела (пристрою з самозбудженням - підсилювача охопленого ланцюгом позитивного зворотного зв'язку) і формувача (електричного фільтра).

Генератори сигналів спеціальної та довільної форми дуже широко використовуються в промисловості, лабораторії, телекомунікаційної і в багатьох інших галузях. Випускаються в даний час моделі включають в себе: функціональні генератори, генератори спеціальної форми, генератори імпульсів, генератори шуму, генератори синусоїдальних сигналів, генератори кодових послідовностей, вимірвальні генератори та інші.

Вихідний сигнал генератора призначений для моделювання певного сигналу, адекватному тому, що обробляється при роботі апаратури. Моделювання – це заміщення одного об'єкта (оригіналу) іншим (моделлю) і фіксація і вивчення властивостей моделі. Заміщення проводиться з метою спрощення, здешевлення, прискорення вивчення властивостей оригіналу.

Розвиток комп'ютерних технологій в наш час дає можливості використання не тільки комп'ютерних розрахунків вузлів генератору, а також і моделювати їх роботу на ПК. Також, користуючись інтерфейсами і розробленими програмами використати ПК в якості частини технологічного обладнання комп'ютеризованого комплексу.

РОЗДІЛ 1

СХЕМОТЕХНІКА СУЧАСНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

1.1 Структурна схема і її модифікації.

Класична структурна схема найпростішого функціонального генератора, яку для стислості надалі будемо називати «вихідною структурою», показана на рис. 1.1, а. Замкнутий в кільце інтегратор, що містить ОУ з частотозадаючої яка задає RC-ланцюгом і релейний елемент утворюють автоколивальні систему, яка генерує двухполярні сигнали трикутної і прямокутної форми. З сигналу трикутної форми в преобразованому тілі напруги «трикутник - синус», перетворювач формує сигнал синусоїдальної форми. Якщо при включенні функціональний генератор вихідна напруга релейного елементу дорівнює $+U_2$, то на виході інтегратора в міру підсумовування напруги $+U_2$ матиме місце лінійно-падаюча напруга, яке при досягненні рівня $-U_1$ перемикає релейний елемент на рівень $-U_2$ (рис. 1.1, г). Починаючи з цього моменту, на виході інтегратора спостерігається лінійно-наростаюча напруга, яка при досягненні рівня $+U_1$ переключаче релейний елемент в первісний стан ($+U_2$). Далі процес триває в тій же послідовності. У результаті на виході інтегратору виникає сигнал трикутної форми, а на виході релейного елементу – прямокутний.

Сигнал синусоїдальної форми U_3 виникає на виході перетворювача (рис. 1.1, в).

При цьому коефіцієнт ділення напруги $K_d = R'/R_f$, де R' - частина опору R_f , з якого сигнал релейного елементу подається на інтегратор.

Якщо петля гістерезису релейного елементу симетрично відносна осям X і Y (як показано на рис. 1.1 ,б), тобто якщо рівні пороги спрацьовування релейного елементу ($\pm U_1$) і рівні його вихідного сигналу ($\pm U_2$). то частота коливань в розглянутому функціональному генераторі, дорівнює $f = K_d U_2 / 4R_i S_i U_1$, де $R_i S_i$ - постійна часу інтегратору.

Дискретна зміна частоти проводиться шляхом перемикання елементів R_i

та S_i інтегратору, а плавне - за допомогою потенціометра. Вихідні сигнали функціонального генератора зазвичай надходять на перемикач форми вихідного сигналу, потенціометр регулювання амплітуди, вихідний операційний підсилювач і на ступінчатий аттенюатор.

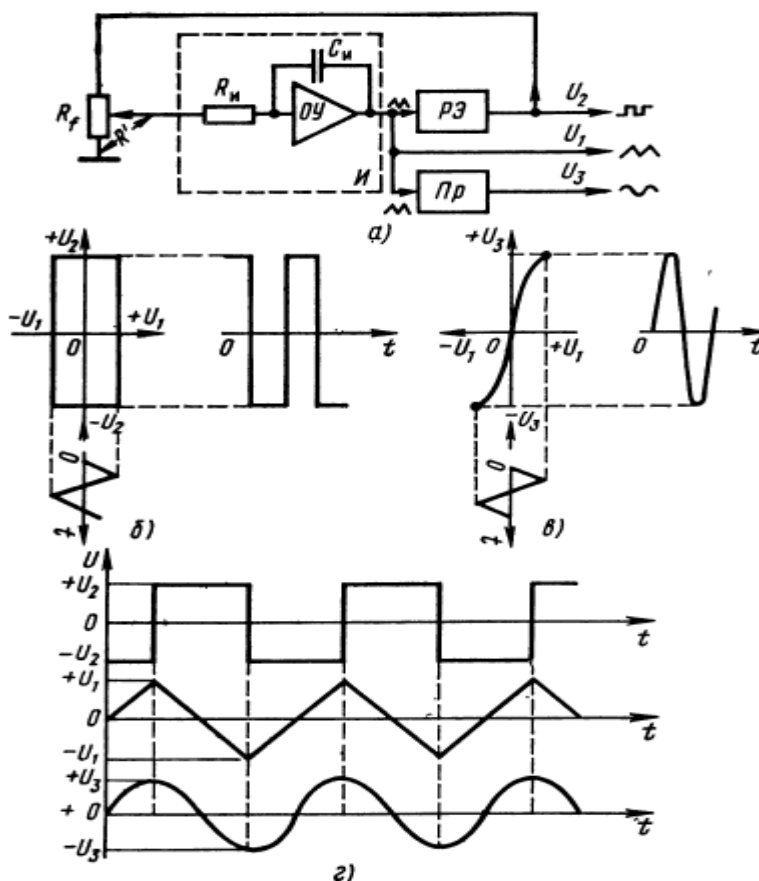


Рис 1.1. Класична структурна схема простого функціонального генератора

Функціональний генератор за типовою схемою (рис. 1.2) виконаний двох операційних підсилювачах в однокорпусному виконанні

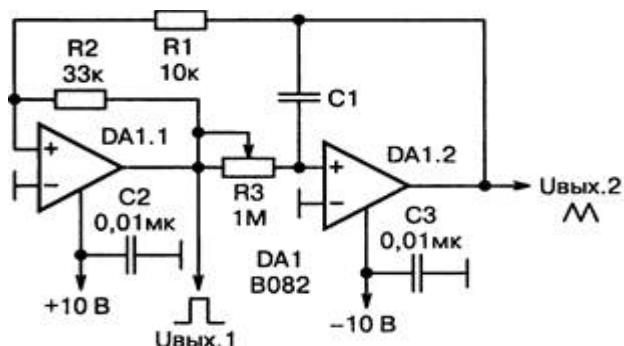


Рис. 1.2. Схема функціонального генератора [1.1]. При $C1 = 4,7 \text{ нФ}$ частота генерації – 30 кГц , при $0 = 47 \text{ нФ}$ – 20 Гц . Напряга живлення генератора може варіюватися в межах $4,5\text{-}18 \text{ В}$.

Функціональний генератор (рис. 1.3) при зміні величини керуючого напруги в межах від 0,25 до 50 В синхронно змінює частоту вихідних сигналів пилкоподібної і прямокутної форми в межах від 700 Гц до 100 кГц [1.2].

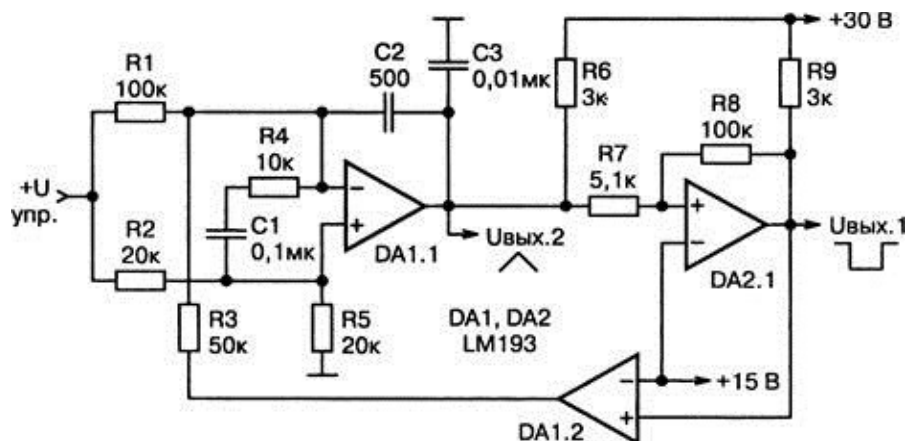


Рис. 1.3. Схема широкодіапазонного функціонального генератора на основі компараторів LM 193

Регульований функціональний генератор (Рис. 1.4) зроблений на трьох однакових операційних підсилювачах, для прикладу, типу LM148, зібраних в одному корпусі для компактності [1.3]. Генератор може виробляти прямокутні і пилковидні імпульси одночасно, форму яких (А) і (В) можна поступово змінювати, користуючись перемикачем S1. Співвідношення часів T1 і T2 визначається співвідношенням комутованих перемикачем S1 резисторів, наприклад, R: R / 100. Періоди часів T1 і T2 визначаються як $T1 = 2RC$ і $T2 = RC / 50$.

З огляду на високу актуальність функціональних генераторів, були створені спеціалізовані мікросхеми цих самих генераторів. Прикладом функціонального генератора являється мікросхема ICL8038 фірми Harris Semiconductor.

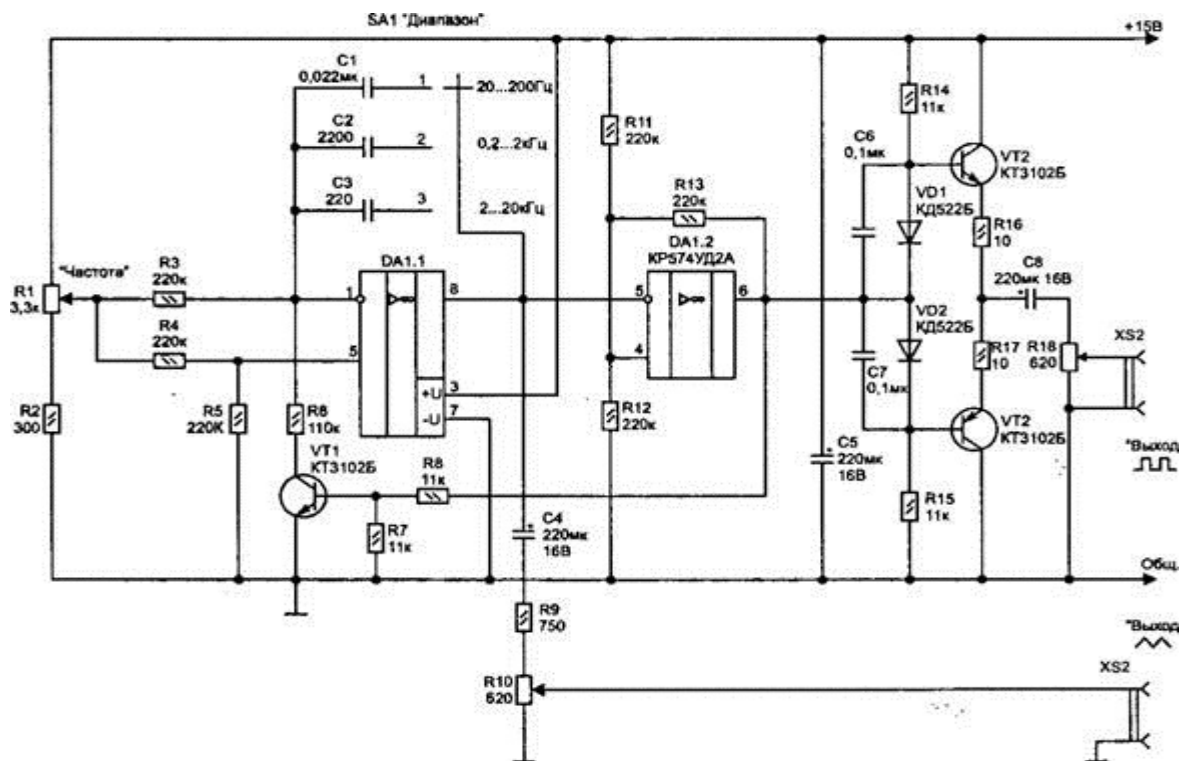


Рис. 1.4. Схема регульованого функціонального генератора

Генератор, зроблений за типовою схемою включення (рис. 1.5), при варіюванні номіналів RC-елементів може працювати в діапазоні частоти 0,001 Гц- 300 кГц. Спотворення форми синусоїдального сигналу менше 1%. Ширину трикутного (прямокутного) імпульсу треба регулювати в межах 2-98%.

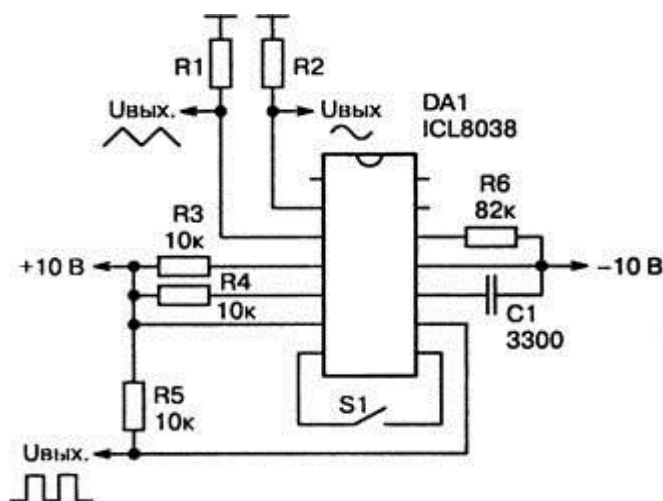


Рис. 1.5. Типове включення мікросхеми ICL8038 в якості функціонального генератора.

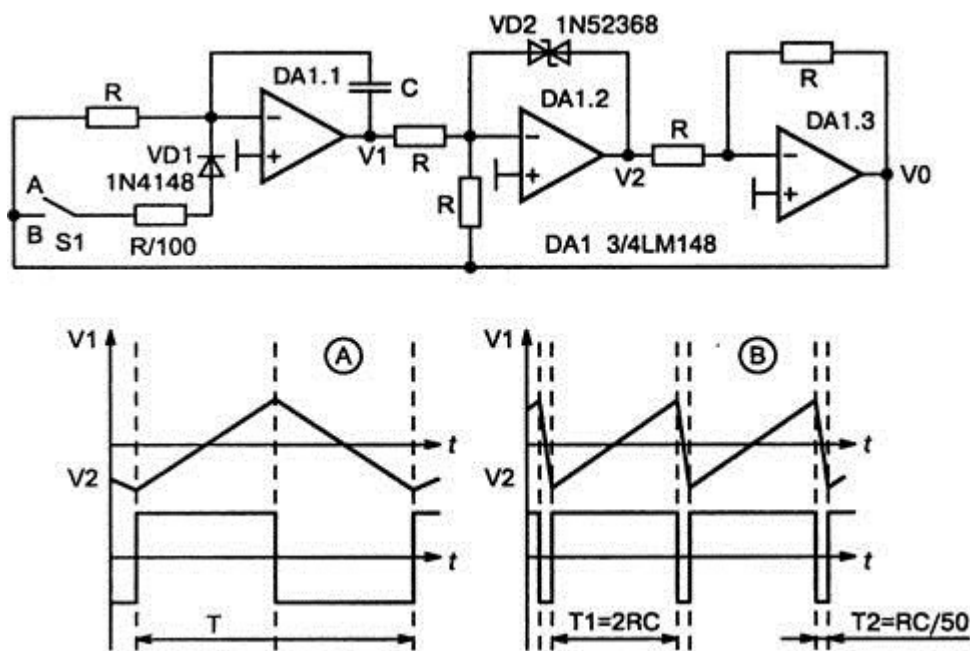


Рис. 1.6. Варіанти підключення резистивних елементів до мікросхеми ICL8038 Напряга живлення $\pm (5-15)$ В при двополярному живленні, або 10-30 В - при однополярному. Споживаний струм мікросхемою не перевищує 20 мА (номінальний - 12 мА) при напрузі живлення ± 10 В. Амплітуда вихідної напруги трикутної форми на опорі навантаження 100 кОм досягає 1/3 від напруги живлення, для сигналу синусоїдальної форми - до 0,22 від напруги живлення.

Варіанти підключення зовнішніх елементів регулювання режиму роботи мікросхеми ICL8038 наведені на рис. 1.6.

При використанні мікросхеми ICL8038 (рис. 1.7) зручно здійснювати частотну модуляцію сигналів, що генеруються. Використовуючи цю особливість мікросхеми нескладно створити генератор сигналів прямокутної, трикутної і синусоїдальної форми, одночасно керованих рівнем зовнішньої напруги.

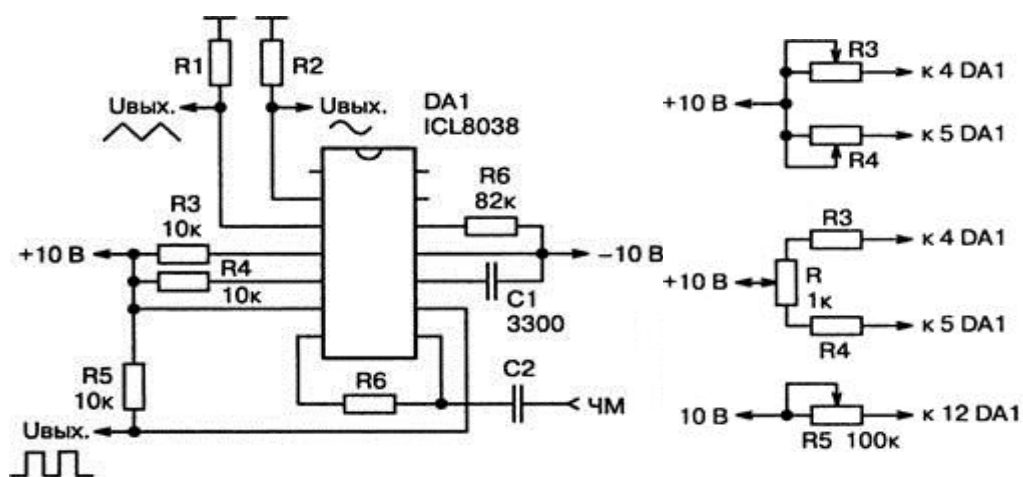


Рис. 1.7. Варіант включення мікросхеми ICL8038 з частотною модуляцією сигналів що генеруються.

Для зменшення спотворень сигналу синусоїдальної форми застосовують регулювання, передбачені схемні рішенням, представлених на рис.1.8

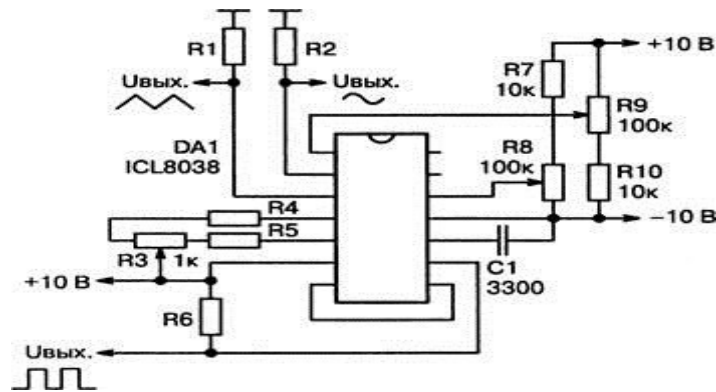


Рис. 1.8. Схема підключення мікросхеми ICL8038 с мінімізацією спотворення сигналу синусоїдальної форми.

Для того щоб підвищити навантажувальну здатність генератора використовують схему, показану на рис. 1.9. Використаний звичайний буферний каскад, який можна використовувати для кожного з виходів функціонального генератора. Опір навантаження визначається вибором мікросхеми ОУ; для наведеного випадку опір навантаження не повинно бути менше 1 кОм.

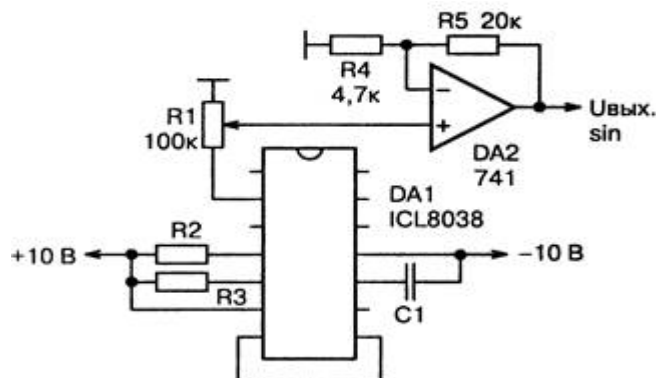


Рис. 1.9 Схема функціонального генератору на мікросхемі ICL8038 з

підвищеною навантажною спроможністю для сигналу синусоїдальної форми.

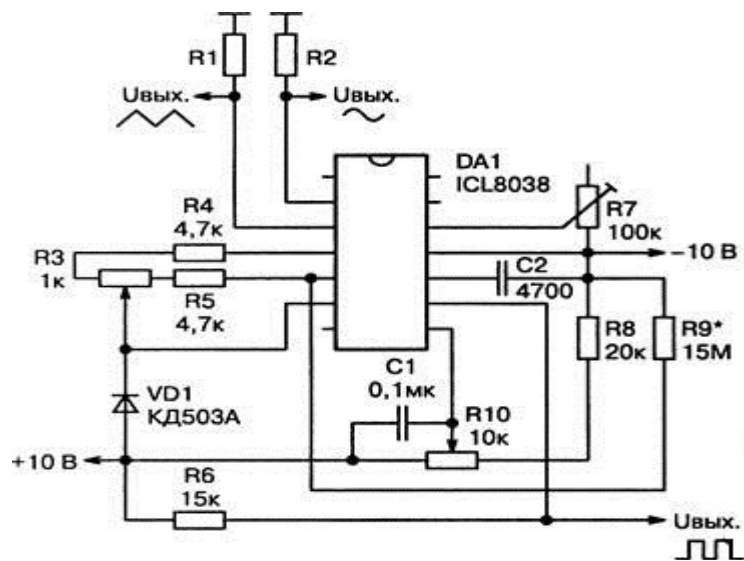


Рис. 1.10. Схема функціонального генератора на мікросхемі ICL8038 с регулюванням частоти от 20 Гц до 20 кГц.

Практична схема широкодіапазонного функціонального генератора, яка перекриває весь діапазон звукових частот, наведена на рис. 1.10.

Потенціометром R7 мінімізують спотворення сигналу синусоїдальної форми. Потенціометр R3 призначений для регулювання співвідношення імпульс / пауза (або симетрії) генеруючих сигналів. Потенціометром R10 регулюють частоту генеруючих сигналів.

Аддитивний формувач сигналів трикутної форми

Електричні сигнали трикутної форми зазвичай отримують при використанні зарядно-розрядних процесів в RC-ланцюгах. У роботах [1.4-1.6] описаний і проаналізований [1.7] принцип формування сигналів трикутної форми шляхом протифазного складання випрямлених з використанням двох напівперіодних випрямлячів сигналів синусоїдальної форми, зсунутих між собою на кут 90° . Нижче наведено варіант практичної реалізації перебудовуваного за частотою генератора сигналів трикутної форми, що використовує даний принцип синтезу.

На мікросхемах DA1-DA3 зібраний LR-генератор сигналів синусоїдальної форми, з виходів якого знімаються зсунуті по фазі на кут 90°

сигнали (точки А і В). Ці сигнали подаються на входи двох прецизійних випрямлячів, виконаних на мікросхемах DA4, DA5 і DA6, DA7, відповідно. Сигнали з виходів випрямлячів (точки С і D) змішуються на резистивному суматорі-дільнику напруги R13, R15, R16 (точка Е). Вихідний сигнал (точка Е) має трикутну форму з відхиленням від лінійності до 3%.

Робоча частота генератора визначається номіналами частотозадаючих ланцюгів - індуктивності L1, L2, зведеного потенціометра R9, R10 і резисторів R7, R8. Для зазначених номіналів діапазон частоти перебудови становить 3300-4000 Гц.

Ступінчасто змінити частотний діапазон роботи можна перемиканням котушок індуктивності L1, L2. При розширенні діапазону перебудови шляхом подальшої зміни співвідношення елементів

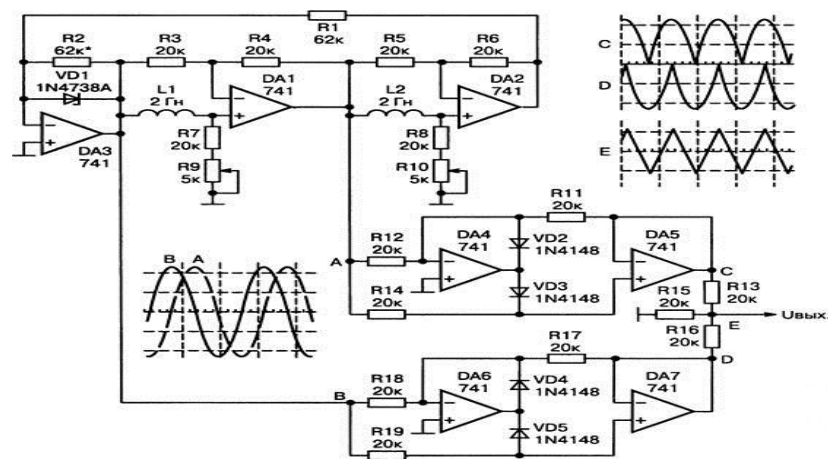


Рис. 1.11. Схема без ємнісного перебудовуваного генератора сигналів трикутної форми.

$R7/R9=R8/R10$ стає помітно виражена залежність амплітуди вихідного сигналу від частоти. Для виключення цього недоліку необхідно або звузити діапазон перебудови генератора, або використовувати проміжні підсилювачі з автоматичним регулюванням посилення.

Функціональний генератор інверсної побудови

При створенні функціональних генераторів традиційно використовують генератор прямокутних імпульсів, до виходу якого підключають формувач трикутної напруги, заснований на зарядно-

розрядних процесах. Потім сигнал трикутної форми перетворюють на подібну синусоїдальною, виділяючи з неї першу гармоніку [1.8]. Недоліки таких схемних рішень очевидні: це явно виражена нелінійність заряднорозрядних процесів, особливо помітна при перебудові частоти генератора і помітні спотворення синусоїдального сигналу в результаті неякісної фільтрації вищих гармоній складного сигналу.

Нижче описаний функціональний генератор формування сигналів в якому відбувається в зворотній послідовності. Спочатку формується сигнал синусоїдальної форми, який потім перетворюється в сигнал трикутної форми [1.4-1.6], а з останнього отримують біполярний сигнал прямокутної форми [1.9].

Практична схема інверсного функціонального генератора представлена на рис. 1.12. Пристрій містить генератор сигналів синусоїдальної форми (мікросхеми DA1- DA3), що виробляє сигнали, зсунуті по фазі на 90° . Ці сигнали подаються на подвоювач частоти С. І. Семенова [1.5] - прецизійні двухнапівперіодні випрямлячі (мікросхеми DA4, DA5 і DA9, DA10), вихідні сигнали яких складаються в протифазі, формуючи тим самим сигнал трикутної форми. Сигнал трикутної форми надходить потім на схему формування біполярних імпульсів прямокутної форми (мікросхеми DA6-DA8).

Діаграми сигналів в різних точках пристрою показані на рис. 1.12.

Генератор працює в діапазоні частот: для сигналів синусоїдальної форми – 50- 500 Гц, для сигналів трикутної і прямокутної форми (з подвоєнням вихідної частоти)

– 100-1000 Гц. Робочу частоту плавно змінюють перебудовою здвоєного потенціометра R9, R10. Ступінчасте перемикання діапазону частот, що генеруються аж до субгерцових може бути забезпечено перемиканням частотозадаючих конденсаторів С2 і С3. Так, при зменшенні ємностей конденсаторів С2 і С3 в 10 разів, т.е. до 3,3 нФ, діапазон частот, що генеруються становить 1000-10000 Гц по пилкоподібному і прямокутному

сигналам; за синусоїдальним – 500-5000 Гц.

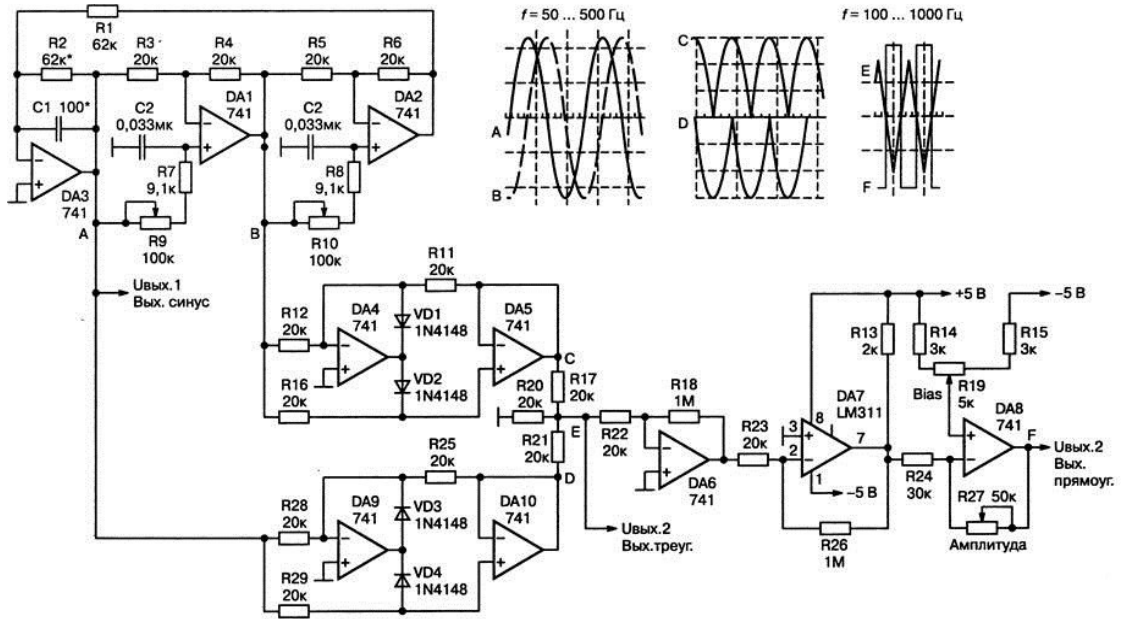


Рис. 1.12. Функциональный генератор инверсного построения

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА. РОЗРАХУНОК ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА З ПСЕВДОСЕНСОРНИМ КЕРУВАННЯМ

На основі аналого-цифрового пристрою розробити функціональний генератор сигналів по заданим параметрам. Генератор повинен мати

цифрове псевдосенсорне керування та блок відображення інформації на матричних світлодіодних індикаторах. Маємо початкові дані. Форма вихідних імпульсів: прямокутна, пілкоподібна; діапазон частот: 0,1-10000 Гц; Дискретність керування в діапазоні: $0.1 f_c$; Амплітуда вихідних імпульсів: 1 В; Дискретність керування: 0,01 В; Вихідний опір генератора: 50 Ом [20].

2.1 Розробка структурних схеми функціонального генератора сигналів

Типова структурна схема функціонального генератора з цифровим управлінням, яка відповідає завданню представлена на рисунку 2.1, а блок-схема пристрою індикації на рисунку 2.2.

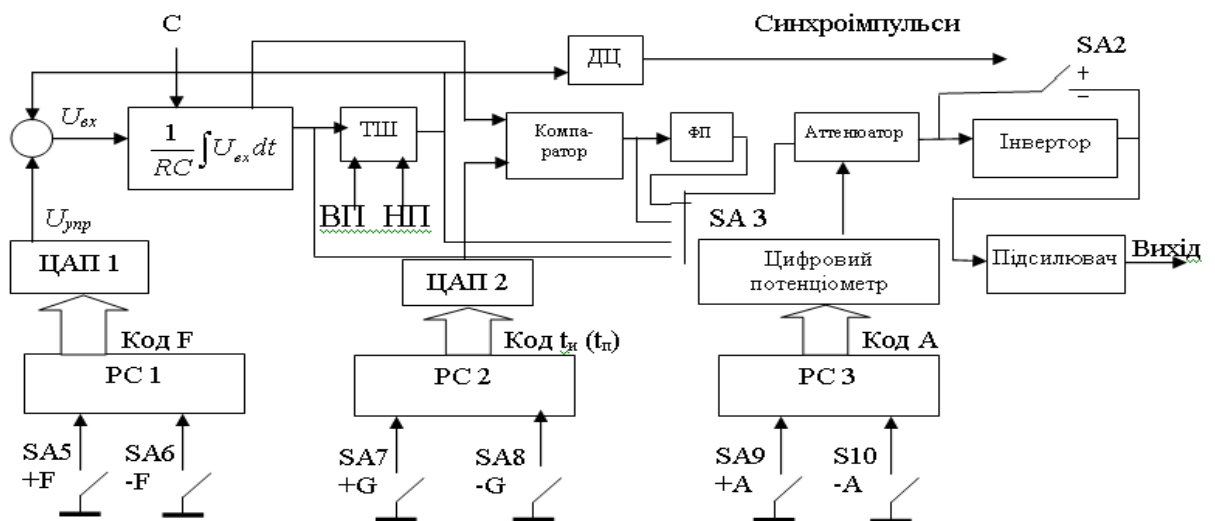


Рис. 2.1 Структурна схема функціонального генератора.

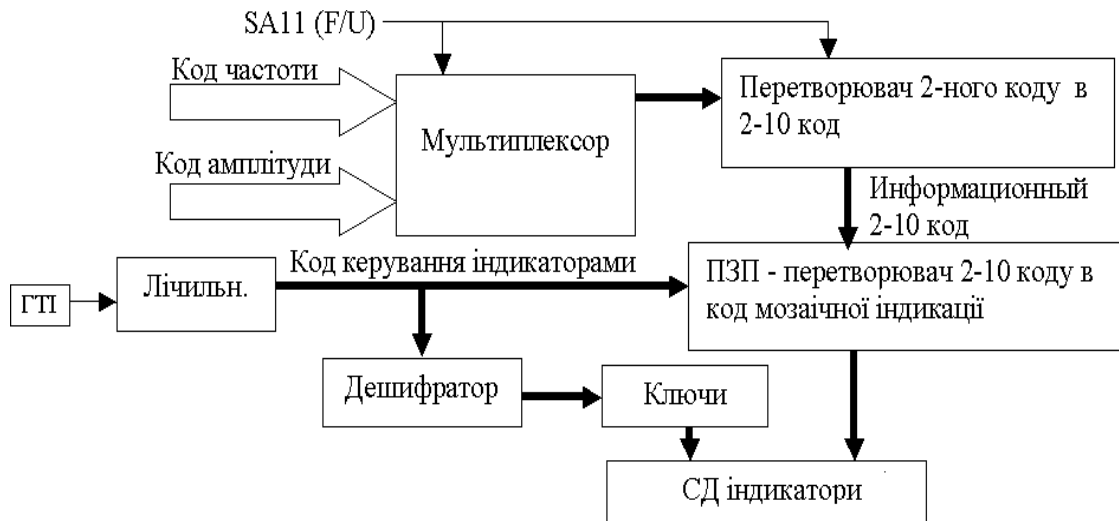


Рис. 2.2 Блок-схема пристрою відображення цифрової інформації на світлодіодних матричних індикаторах.

На рисунках 2.1 і 2.2 прийняті позначення: T – період проходження вихідних сигналів (для прямокутних імпульсів $T=t_i+t_n$ – рівний сумі тривалості імпульсу і паузи, для пилкоподібних (трикутних) $T=t_n+t_{сп}$ – сумі часу наростання і спаду; $F = 1/T$ – частота, Гц; A – амплітуда, В; ТШ – тригер Шмідта; ВП, НП – верхній і нижній пороги його спрацьовування; ЦАП – цифро-аналогові перетворювачі; РС – реверсивні лічильники; ПЗП – постійний запам’ятовуючий пристрій; ГТІ – генератор тактових імпульсів для управління динамічною індикацією [22].

ФП – функціональний перетворювач трикутної форми сигналу в синусоїдальну форму.

Схема працює таким чином. Пристрій, що задає часові параметри коливань є генератором одночасно трикутних і прямокутних імпульсів. Він складається з інтегратора і тригера Шмідта, охоплених ПЗЗ, що забезпечує режим автоколивань.

Частота генератора визначається коефіцієнтом передачі інтегратора $K_u = RC$ і рівнем вхідної напруги, що визначається від арифметичного складання напруг зворотнього зв'язку і управління: $U_{вх} = U_{упр} - U_{зв.зв}$

Частота генератора змінюється дискретно, шляхом зміни K_u параметрами ємності C в ланцюзі ОС операційного підсилювача. Зміна здійснюється перемикачем SA1 і забезпечується чотирма піддіапазонами

вихідної частоти з деяким перекриттям: 0,1-10 Гц; 1-100; 10-1000; 100-10000 Гц. Піддіапазони вибрані з вимог завдання, згідно якому весь діапазон частот 0,1-10000 Гц, дискретність регулювання в піддіапазонах складає $f_s/100$, де f_s – верхня частота діапазону. Звідси необхідне число ступенів, не менше 100. В середині піддіапазонів частота змінюється плавно за допомогою пристрою управління, що включає реверсивний лічильник РС1, виходи якого підключені до ЦАП1 формуючого напругу $U_{упр}$. Лічильник РС1 управляється від кнопок $-F$ або $+F$, кількість натискань на які визначає зменшення або збільшення $U_{упр}$ у піддіапазоні в межах від 1 до $100 = 1100100_2$ (7 бінарних розрядів).

Лінійна напруга трикутної форми, що змінюється, поступає на вихід генератора через перемикач режиму роботи, а також на функціональний перетворювач трикутної форми сигналу в синусоїдальну форму. Функціональний перетворювач проводить апроксимацію сигналу в декількох точках, використовуючи властивості вольт-амперних характеристик напівпровідникових діодів і транзисторів. Залежно від вибраної кількості точок забезпечується необхідна точність перетворення.

Крім того, з трикутної напруги формується пилкоподібна напруга з регульованою тривалістю спадаючого (заднього) фронту. Для цього вона поступає на прямий вхід компаратора, на інверсний вхід якого поступає напруга, сформована ЦАП2 і пропорційна необхідному співвідношенню спадаючої і наростаючої частин імпульсу. Код для ЦАП2 формується згідно коду ЦАП1, кнопками $+G$, $-G$, при цьому регулюється шпаруватість прямокутних імпульсів.

Вихідна напруга компаратора поступає на атенюатор, в ланцюзі зворотнього зв'язку, якого знаходиться цифровий потенціометр, керований кодом. Амплітуда задається за допомогою курсорних клавіш $-A$ і $+A$, які управляють надходженням імпульсів на відповідні входи реверсивного лічильника РС3 (8 бінарних розрядів). Згідно вимогам ТЗ, весь діапазон

регулювання вихідної напруги складає 1-10 В, дискретність регулювання складає 0,1 В. Звідси необхідне число ступенів, забезпечуваних РСЗ не менше 100. Вихідний код лічильника формується по сигналах від відповідних кнопок, створюючи при кожному натисненні пачки з п'яти імпульсів.

На виході реверсивного бінарного лічильника створюється можливість для формування будь-якої зі 100 бінарних комбінацій в діапазоні 0-10 В з дискретністю, що відповідає 0,1 В. Коди керують цифровим потенціометром ЦАП2 в ланцюзі негативного зворотного зв'язку операційного підсилювача, який керує рівнем вихідного сигналу.

Через перемикач сигнал поступає через інвертор безпосередньо або на кінцевий каскад. В результаті забезпечується можливість управляти полярністю вихідних імпульсів. Параметри вихідного каскаду забезпечують даний вихідний опір генератора 50 Ом. Схема індикації складається з мультиплексора, що підключає на індикацію код частоти або амплітуди перетворювача бінарних кодів в бінарно-десятковий код, дешифратора, лічильника, ключів і перетворювача кодів для СД індикаторів, а також світлодіодних матричних індикаторів.

Коди, які відображуються, поступають на мультиплексори, що в залежності від стану перемикача режиму індикації підключають на індикацію необхідний код. З виходу мультиплексору код індикації поступає на перетворювач бінарного коду в бінарно-десятковий. Схема їх включення забезпечує перетворення 8-ми розрядних бінарних чисел (до 256 і 512) в три тетради бінарно-десяткового коду для індикації. Вихідний ПЗП код розбивається на три тетради для індикації на семисегментних (АЛС324 або аналогічних) або матричних індикаторах. (АЛС340А). Матричні індикатори є матрицею світлодіодів розмірністю 5x7.

При побудові цифрової і аналогової частини схеми доцільно використовувати ОУ і цифрові елементи одного типу. Вибір ОУ здійснюється по параметрах напруги живлення та ін. Повинні виконуватися

умови: $U_{\max} \leq U_{\text{жОУ}} \leq U_n$,

де U_{\max} - максимальна вихідна напруга;

$U_{\text{жОУ}}$ - напруга живлення підсилювача.

$U_{\max} \leq 10$ В. $V_{\text{вих}} > U_{\max}$ $\tau = 10/1 \cdot 10^{-6} = 10^7$ В/с. В якості ДА виберемо ОУ

К140УД7, в якому $I_{\text{ВХ.ОУ}} = 200$ нА, коефіцієнт підсилення $K_U > 50000$, $R_{\text{вих}} < 10$ Ом.[22]

Вибираємо ТТЛ ІС серії 555, 556, 155, які мають велику номенклатуру і добре узгоджені з світлодіодними матричними індикаторами.

2.2 Розробка і розрахунки параметрів принципів схем

Схема електрична принципова блоку формування сигналів функціонального генератора складається з п'яти операційних підсилювачів (ОУ). Основу його складає схема генератору на основі інтегратору і компаратору, які включені по схемі з позитивним зворотнім зв'язком (ПЗЗ), що дає можливість формувати два види сигналів одночасно: трикутні і прямокутні. Пристрій на ДА1 призначений для інвертування напруги та плавного управління частотою діапазону.

Генератор трикутних імпульсів, що складається з інтегратора ДА2, коефіцієнт передачі якого регулюється східчасто, шляхом комутації відповідних ємностей перемикачем SA1 і плавно, шляхом зміни рівня напруги на його вході з ЦАП1 (ДА6, ДА7); тригера Шмідта ДА3, пороги перемикання якого задаються пристроями на ДА4, ДА5.

Для регулювання шпаруватості прямокутних імпульсів і заднього фронту пилкоподібної напруги застосований пристрій електронного управління, який вміщує ЦАП2 (ДА6, ДА7).

У задаючому генератору використовується грубе (перемиканням) і точне регулювання частоти. Грубе регулювання здійснюється перемиканням значень ємності С залежно від вибраного діапазону, а плавна – за

допомогою напруги U_0 , відповідно до заданої частоти, яке подається через інвертор DA1 і електронний комутатор VD1-VD4. На DA2 реалізований інтегратор, а на DA3 виконаний тригер Шмідта.

Інтегратор інтегрує зміну постійної напруги, формованої на виході тригера Шмідта. Коли величина вихідної напруги інтегратора досягає верхнього порогу спрацьовування тригера Шмідта, то напруга на його виході стрибком міняє свій знак. Внаслідок цього величина напруги на виході інтегратора починає змінюватися в протилежну сторону, до тих пір, поки воно не досягне нижнього порогу спрацьовування тригера Шмідта. Пристрої на DA4, DA5 задають пороги спрацьовування тригера Шмідта. Часові діаграми наведені на рисунку 2.3.

Тривалості імпульсів, що становлять період коливань, визначається з виразів:

$$t_2 = r \cdot R_6 \left(1 + \frac{E_2}{E_1}\right) R_7, t_1 = r \cdot R_6 \cdot \left(1 + \frac{E_1}{E_2}\right) R_7, \text{ де } r - \text{ стала часу інтегратора.}$$

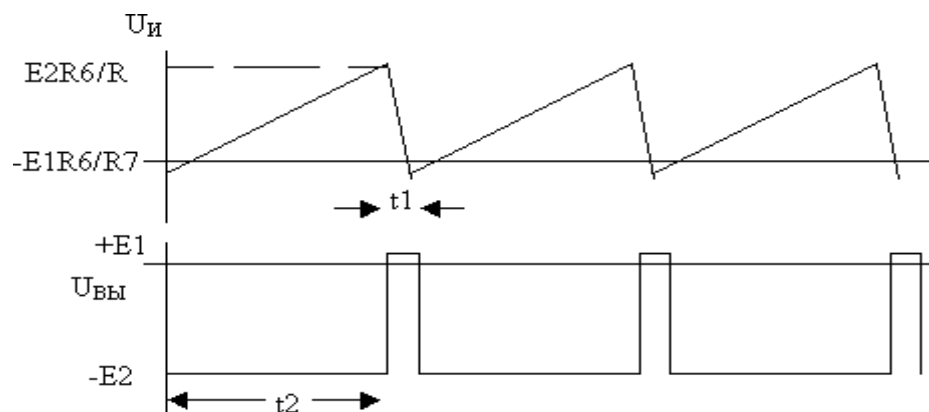


Рис. 2.3. Часові діаграми блоку формування сигналів.

У схемі ймовірно формування прямокутних імпульсів з регульованою шпаруватістю шляхом зміни напруг E_1 і E_2 , однак при цьому змінюється амплітуда і частота. Тому краще використовувати технічне рішення генератора з постійною амплітудою, але з регульованою частотою.

Для отримання максимального коефіцієнта заповнення 0,99 беремо значення E_1 і E_2 . Для цього приймемо $R_{11}=100$ кОм, $R_{12} = 1$ кОм.

Тоді частота генератора буде відповідати $f = \frac{U_{0 \cdot R_7}}{100RCR}$.

Для обраного перемножуючого ЦАП572ПА1 приймемо розмах вихідної напруги $U_0 = U_{max} = 10$ В (напруга стабілітрона VD9) і при $R_6=R_7=10$ кОм, маємо

- Для першого піддіапазону 0.1-10 Гц: $R_5C_3 = \frac{1}{10f_B} = 0.1 \cdot 10^{-3}$ с;
- Для другого піддіапазону 1-100 Гц: $R_5C_4=1 \cdot 10^{-3}$ с;
- Для третього піддіапазону 10-1000 Гц: $R_5C_5=10 \cdot 10^{-3}$ с;
- Для четвертого піддіапазону 10-1000 Гц: $R_5C_6=100 \cdot 10^{-3}$ с.

Прийнявши $R_5=200$ кОм, визначаємо: $C_3=0.05$ мкФ; $C_4=5$ нФ; $C_5=510$ пФ; $C_6= 50$ пФ. [20]

У середині кожного з піддіапазонів частота генератора регулюється за допомогою напруги з виходу ЦАП 1 (DA6, DA7). Код ЦАП1 формується шляхом генерації коду реверсивним лічильником РС 1 (DD12, DD13), курсорними клавішами –F та +F. З виходу інтегратора DA2 трикутні імпульси поступають на компаратор DA8, на інший вхід якого поступає напруга ЦАП 2 (DA12, DA13), пропорційна тривалості імпульсу. Код ЦАП 2 формується шляхом генерації коду реверсивного лічильника РС 2 (DD18, DD19) курсорними клавішами –G, +G. Натиснення на –G – зменшує на одиницю. Тригери Шмідта (DD1) виключають брязкіт контактів; кожне натиснення клавіші +G збільшує код на 1.

З виходу функціонального перетворювача сигнал поступає на контакт перемикача режимів роботи генератора.

Для отримання сигналу пилкоподібної форми використовується компаратор DA8, керований курсорними клавішами –G, +G через лічильники DD18, DD19 і ЦАП DA13, DA14. Сигнал з нього також поступає на перемикач режимів роботи SA3.

Вихід перемикача підключений до аттенюатора DA9 з електронним управлінням коефіцієнта підсилення. Для цього, в якості резистору кола зворотного зв'язку використана матриця резистора ЦАП, який забезпечує функцію цифрового потенціометра, керованого кодом. Код потенціометра

генерується за допомогою реверсивного лічильника PC3 (DD14, DD15), керованого формувачем число- імпульсного коду (DD5–DD7) послідовностей з 5 імпульсів при натисненні будь- якої з курсорної клавіші (+A, -A). Використання формувача дає можливість забезпечити виконання вимог ТЗ по дискретності регулювання амплітуди і раціонально використовувати матричні індикатори.

Вихід аттенюатора підключений до вихідного підсилювача DA8 через контакт перемикача SA2 або через інвертор DA10. Вихідний каскад генератора (DA11) виконаний по схемі підсилювача без інверсії і виконує функцію буферного каскаду

узгодження. Вихідний опір каскаду рівний:

$$R_{\text{вих}} = \frac{Z_{\text{вихОУ}}}{\nu}$$

Для узгодження виходу генератора з навантаженням і отримання заданого значення $R_{\text{вих}} = 50 \text{ Ом}$, включимо у вихідний ланцюг послідовно резистор $R18 = 390 \text{ Ом}$.

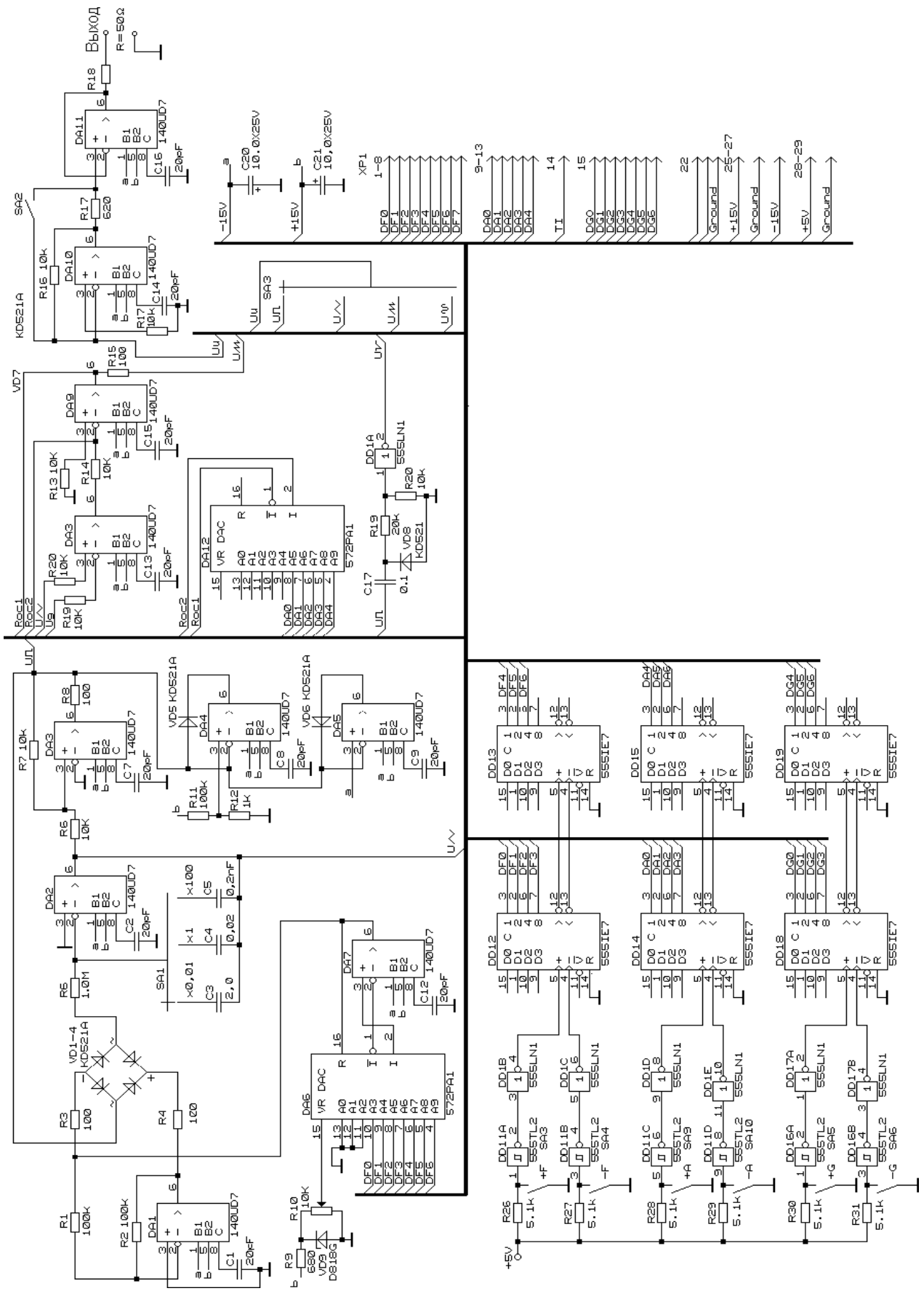


Рис. 2.4. Схема електрична принципова формувача сигналів генератора.

Для формування сигналу синхронізації для осцилографа з виходу функціонального генератору прямокутні імпульси з максимальним коефіцієнтом заповнення подаються через розділовий конденсатор С17 для усунення сталої складової сигналу на діод VD8, який пропускає тільки позитивні імпульси. Згодом через дільник напруги та інвертор-формував сигнал на DD1 вони подаються на вихід. Ці імпульси використовуються для лічильника блоку індикації (DD2).

На індикацію подаються 5-розрядний код амплітуди і 8-розрядний код частоти.

2.3 Розробка пристрою відображення.

Для індикації значень напруг в вольтах от 0 до 1 з дискретністю 0.01 необхідно 100 позицій с десятковим знаком. Таким чином достатньо трьох десяткових розрядів індикатору, а для індикації частоти с дискретністю $f_{\text{диап}}/100=100$ також достатньо трьох розрядів. Тому використаємо трьох розрядний індикатор в режимі індикацій 0 – 100 з комою після другого знаку.

Для індикації частоти блок доповнюється перемикачем SA1 діапазонів з надписами: 0,1-10 Гц; 1-100 Гц; 10-1000 Гц; 100-10000 Гц; x 0,01 – 0,1-10 Гц; x 0,1 – для 1-100 Гц; x 10 – для 10-1000 Гц; x 100 – для 100-100000 Гц.

Перетворення бінарних кодів в бінарно-десяткову систему можна здійснити перетворювачами паралельних кодів за допомогою БІС ПЛМ. Режими індикації визначаються положеннями перемикачу SA11 - В або Гц. Коди величин, які необхідно відображати, йдуть на мультіплектори (DD4-DD5), що вибирають одну з них, тобто підключають на індикацію код або частоти, або амплітуди.

Далі код індикації йде на перетворювач бінарного коду в бінарно-десятковий, виконаний на ПЗП1, ПЗП2 (DD6, 7). Старші адреси ПЗП

вибирають одну з таблиць для індикації – В (напруги), чи Гц (частоти). При цьому в ПЗП1 записані два старші тетради коди індикації (табл.1), у ПЗП2 – молодша (табл. 2). [22]

Якщо перемикач SA7 знаходиться в положенні виміру амплітуди сигнал F=0 надходить на А9 ПЗП. У цьому випадку на індикацію подається величина напруги, коди якої знаходяться в таблиці з адреси 0000. При положенні перемикача в положенні Гц на індикацію подається код частоти. Таблиця перетворення бінарного коду в бінарно-десятковий для індикації частоти розташована з адреси 200 Н.

Для відображення одного символу на СД індикаторі застосовують наступний спосіб:

- на рядки подають скануючий 7-розрядний код, що у кожен момент часу вибирає один з рядків;
- на стовпці подають сім послідовних 5-розрядних кодів.

Для того, щоб відобразити одиницю, необхідно послати коди (табл.3). У табл 3.

наведено коди символу "1" як без десяткової крапки, так і з десятковою крапкою.

Табл.1. Прошивка ПЗУ 1 (старша частина кодів індикації)

Адреса	Дані	Примітка.
0000	00 00 01 01 02 02 03 03 04 04 05 05 00 00 00 00	Напруга
0200	02 02 02 02 02 02 02 02 02 02 03 03 03 03 03 03	Частота
0210	03 03 03 03 04 04 04 04 04 04 04 04 04 05 05	
0220	05 05 05 05 05 05 05 05 06 06 06 06 06 06 06	
0230	06 06 07 07 07 07 07 07 07 07 07 07 08 08 08 08	
0240	08 08 08 08 08 08 09 09 09 09 09 09 09 09 09	
0250	10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 11 11 11 11 11 11	
0260	11 11 11 11 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 13 13	
0270	13 13 13 13 13 13 13 13 14 14 14 14 14 14 14 14	
0280	14 14 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 16 16 16 16	
0290	16 16 16 16 16 16 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17	
02A0	18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 19 19 19 19 19 19	
02B0	19 19 19 19 20 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	

Табл.2. Прошивка ПЗУ 2 (молодша частина кодів індикації)

Адреса	Дані	Примітка.
0000	00 05 00 05 00 05 00 05 00 05 00 05 00 05 00 05	Напруга

0200	00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 00 01 02 03 04 05	Частота
0210	06 07 08 09 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 00 01	
0220	02 03 04 05 06 07 08 09 00 01 02 03 04 05 06 07	
0230	08 09 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 00 01 02 03	
0240	04 05 06 07 08 09 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09	
0250	00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 00 01 02 03 04 05	
0260	06 07 08 09 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 00 01	
0270	02 03 04 05 06 07 08 09 00 01 02 03 04 05 06 07	
0280	08 09 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 00 01 02 03	
0290	04 05 06 07 08 09 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09	
02A0	00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 00 01 02 03 04 05	
02B0	06 07 08 09 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	

Необхідну послідовність дій забезпечує бінарний лічильник (DD2), дешифратор (DD3), ключі на транзисторах VT1-VT7 і перетворювачі кодів для СВ індикаторів на ПЗУ 3,4 (DD9, DD10). Вони отримані для кожного символу (рис. 2.5) також, як у прикладі для індикації одиниці. [22]

Табл.3. Кодування символів відображення

Код сканування	Код символу без десяткової крапки		Код символу з десятковою крапкою	
	Бінарний	Шістнадцятирічний	Бінарний	Шістнадцятирічний
0000001	00100	04	00100	04
0000010	01100	0C	01100	0C
0000100	10100	11	10100	11
0001000	00100	04	00100	04
0010000	00100	04	00100	04
0100000	00100	04	00100	04
1000000	00100	04	00101	05

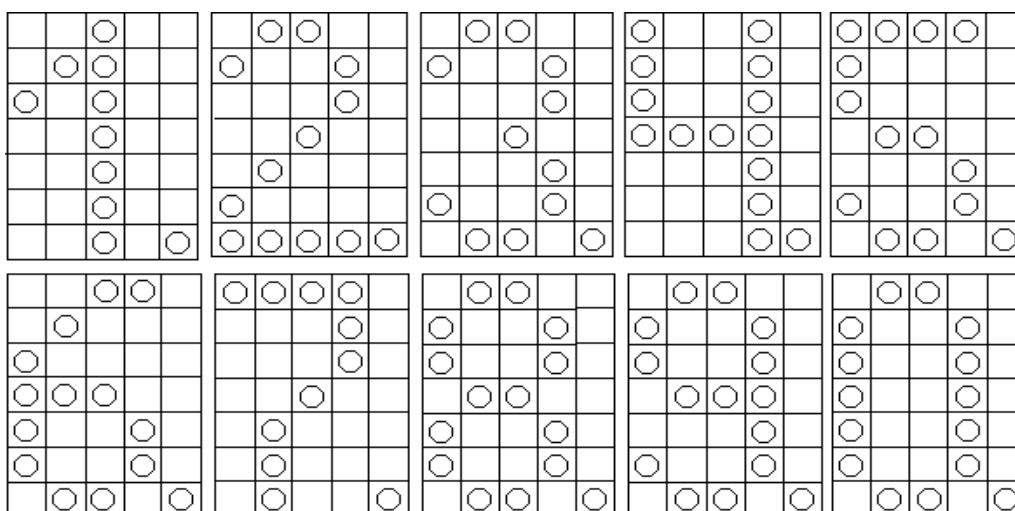


Рис. 2.5. Представлення десяткових цифр матрицею 5x7 Форми.

Табл 4. Прошивання ПЗУ 3 і ПЗУ 5 (коди символів без десяткової крапки).

Адреса	Дані	Символ	Примітка
0000	0C 12 12 12 12 0C 00	0	Коди індикації СД матриці
0008	04 0C 11 04 04 04 00	1	
0010	0C 12 02 04 08 10 1C 00	2	
0018	0C 12 02 04 02 12 0C 00	3	
0020	12 12 12 1E 02 02 02 00	4	
0028	1E 10 10 0C 02 12 0C 00	5	
0030	06 08 10 1C 12 12 0C 00	6	
0040	1F 01 01 02 04 04 04 00	7	
0048	0C 12 12 0C 12 12 0C 00	8	
0050	0C 12 12 0E 02 12 0C 00	9	

В ПЗУ4 знаходяться символи середньої тетради. Після неї має висвітлюватись десяткова крапка. Тому прошивка ПЗУ4 відрізняється від ПЗУ3 і 5 – в неї приведені символи з десятковою точкою (табл.5).

Табл.5 Прошивка ПЗУ 4. (коди символів з десятковою крапкою).

Адреса	Дані	Символ	Примітка.
0000	0C 12 12 12 12 12 0C 00	0	Коди індикації СД матриці
0008	04 0C 11 04 04 04 05 00	1	
0010	0C 12 02 04 08 10 1D 00	2	
0018	0C 12 02 04 02 12 0D 00	3	
0020	12 12 12 1E 02 02 03 00	4	
0028	1E 10 10 0C 02 12 0D 00	5	
0030	06 08 10 1C 12 12 0D 00	6	
0040	1F 01 01 02 04 04 05 00	7	
0048	0C 12 12 0C 12 12 0D 00	8	
0050	0C 12 12 0E 02 12 0D 00	9	

ПЗУ3 (DD8) використовується для перетворення коду старшої тетради, ПЗУ4 (DD9) – середньої, ПЗУ5 (DD10) – молодшої. Сканування здійснюється за 8 тактів. В останньому такті подається код гасіння 00.

Схема електрична принципова пристрою відображення представлено на рисунку 2.6.

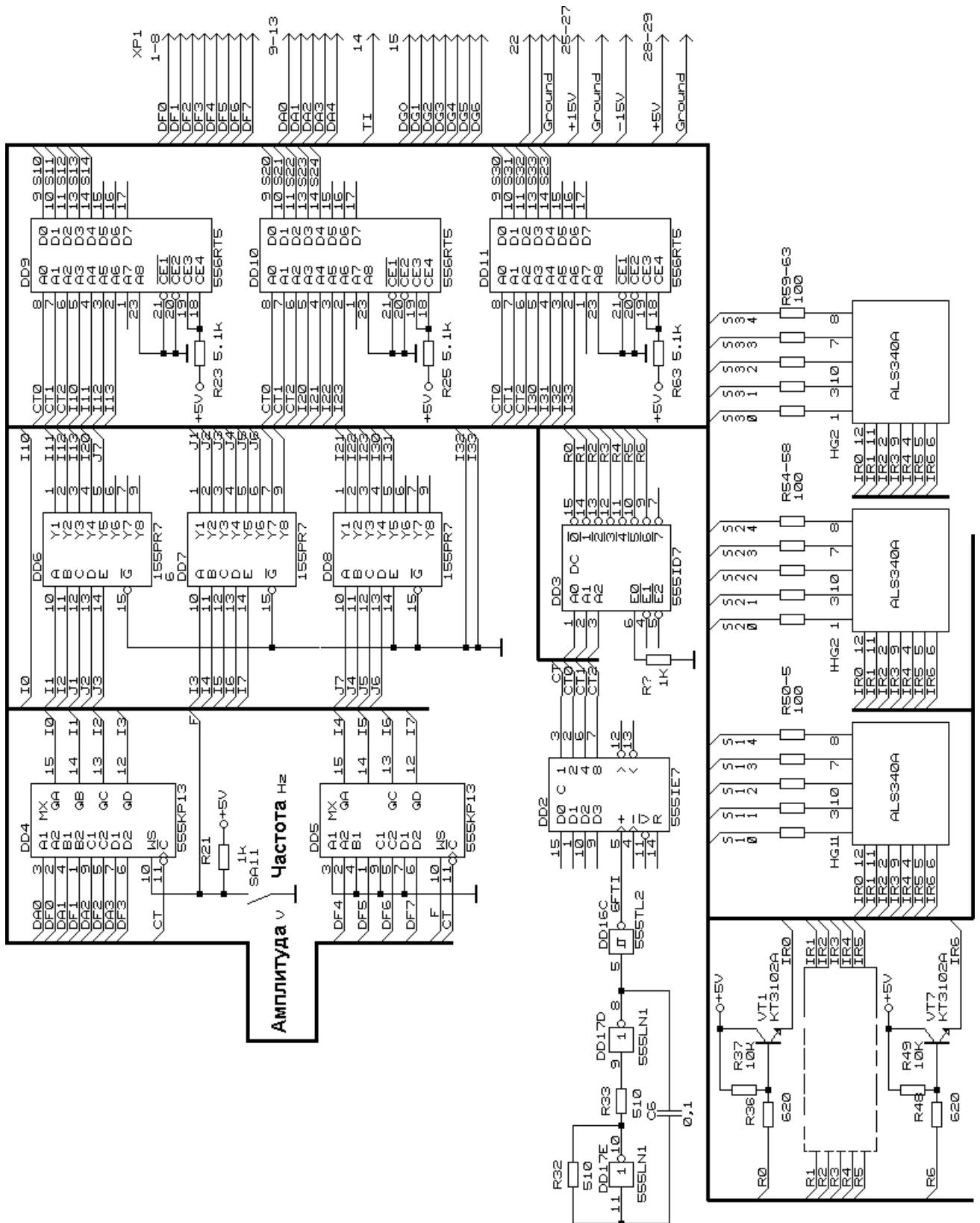


Рис. 2.6. Схема електрична принципова пристрою відображення. [22]

РОЗДІЛ 3

СУЧАСНІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

3.1 Функціональні генератори, керовані напругою або струмом

При побудові простих функціональних генераторів можливості управління їх параметрами (частотою) виявляються обмеженими. Так, в генераторах грубу зміну частоти можна здійснювати перемиканням конденсатора ланцюга C , а плавну зміну частоти здійснюється зміною там же R . Кратність плавної зміни частоти може досягати від десятків до сотень разів.

Однак для сучасних функціональних генераторів звичайно треба реалізація електронного зміни частоти, а нерідко і інших параметрів, наприклад, несиметрії падаючої і наростаючої частин трикутного (іноді і "синусоїдального") напруги. Електронна зміна частоти за допомогою керуючої напруги або струму перетворює функціональний генератор в генератор хитаючої частоти і дозволяє застосовувати його для зняття фазочастотних (ФЧХ) і амплітудно-частотних (АЧХ) характеристик різних пристроїв і систем.

Взагалі є два способи електронного управління частотою функціонального генератора:

- зміною струмів заряду і розряду конденсатора;
- зміною рівнів U і K , спрацьовування релейного елемента.

Другий спосіб звичайно веде до зміни амплітуди вихідних сигналів, що є небажано. У зв'язку з цим далі розглядаються тільки такі структури функціональних генераторів, у яких управління частотою реалізовано тільки зміною струму заряду і розряду конденсатора. Зазначимо, що в загальному випадку різниця рівнів зарядного і розрядного струму дозволяє одержувати несиметричні по тривалості напівперіодів сигнали.

На рис. 3.1 наведена узагальнена блок-схема функціонального

генератора, керованого напругою, звичайно, що знімається з прецизійного дротяного потенціометра R_f . Блок управління частотою (Буч) створює пару напруг або струмів, які можуть мати додаткові збільшення для здійснення частотної модуляції. Для цього на "вхід ЧС" подається модулююча напруга від низькочастотного генератора.

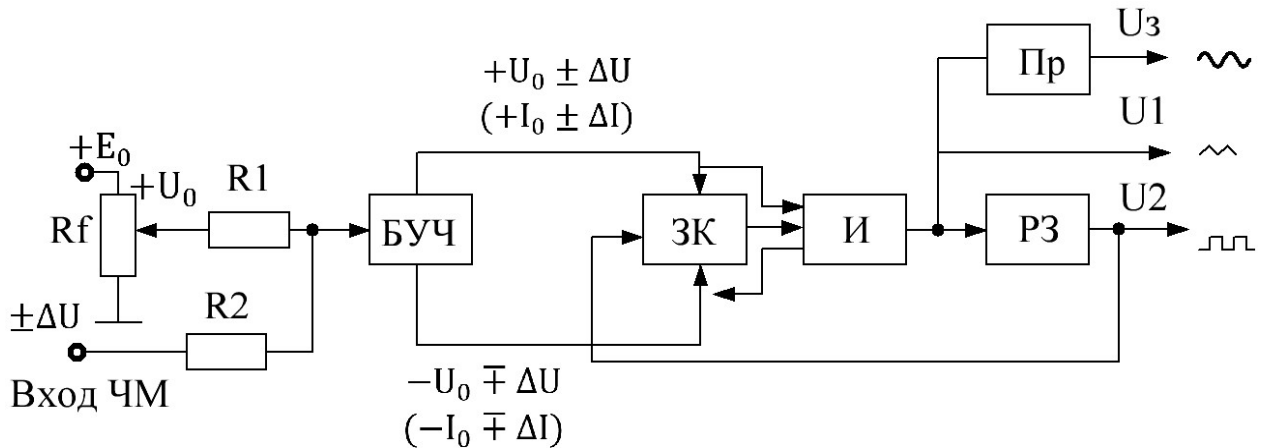


Рис.3.1. Блок-схема частотно-модульованого функціонального генератора

На вхід інтегратора йдуть поперемінно (за допомогою електронного комутатора (ЕК)) струми або напруги різної полярності, які і визначають часи розряду і заряду конденсатора інтегратора.

Досвід розробки серійних функціональних генераторів до 80-х років двадцятого століття показав, що генератори на дискретній елементній базі (із застосуванням інтегральних операційних підсилювачів перших поколінь) дозволяли отримати верхню генеруючу частоту 1 МГц. Але в цьому випадку доводилося використовувати ряд схемотехнічних прийомів для отримання сигналів з близькими до ідеальних формами:

- температурну стабілізацію і компенсацію падінь напруги на відкритих діодах ЕК;
- ретельний відбір інтегральних операційних підсилювачів для реалізації функцій інтегрування;
- побудова досить складних схем перетворювачів напруги в струм і напруги в напругу;

- створення спеціальних перетворювачів трикутного напруги в синусоїдальне з малим коефіцієнтом нелінійних спотворень останнього;
- здійснення спеціальних заходів по конструктивному виконанню генераторів і їх екранування як внутрішньої, так і зовнішньої.

Труднощі в побудові функціональних генераторів багато разів зростали при збільшенні максимальної частоти генерації з одного до десятків МГц. Вони стали непереборними, і лише з розробкою нових поколінь інтегральних широкосмугових підсилювачів і (особливо) спеціалізованих інтегральних мікросхем функціональних генераторів з'явилася можливість створення дійсно легких і малогабаритних пристроїв цього типу з максимальними частотами, що досягають десятків МГц.

3.2 Генератор сигналів довільної форми на базі ПК

Серія генераторів АКИП на базі персональних комп'ютерів поповнилася новою високопродуктивною моделлю АКИП-3412. Новий генератор володіє найвищими технічними показниками в серії: дозвіл по амплітуді - 14 біт, частота дискретизації в реальному часі 2,5 ГГц і смуга пропускання 1 ГГц. Приклад генератору АКИП-3412 наведений на рис. 3.2 [21].



Рис 3.2 Функціональний генератор АКИП-3412

Висока смуга пропускання і високу роздільну здатність дозволяє створювати за допомогою АКИП-3412 найскладніші за формою високочастотні сигнали, з цифровою або аналоговою модуляцією для функціональних тестів, де потрібна висока продуктивність.

Можливості для тестування:

- генератор ВЧ-сигналів;
- цифрова модуляція;
- ультра-низький рівень гармонійних спотворень;
- вибір типу вихідного сигналу: високочастотний, з внутрішнього ЦАП, DC;
- високошвидкісний цифровий вихід;
- мультиканальна синхронізація (управління декількома генераторами при їх синхронній роботі);
- поєднання в одному приладі різних принципів формування сигналу - прямий цифровий синтез, генератор довільних форм або функціональний генератор.

Управління генераторами АКИП-3412 здійснюється через ПК по USB інтерфейсу. Керуюче програмне забезпечення може бути встановлене на будь-персональному комп'ютері, а також на контрольно-вимірювальному обладнанні, що має «відкриту платформу», наприклад на осцилографах LeCroy. Це дає широкі можливості по комбінуванню різних засобів вимірювань на базі ПК і формування єдиного програмно-апаратного комплексу. Скан екрану інтерфейсу функціонального генератора АКИП-3412 наведений на рис. 3.3

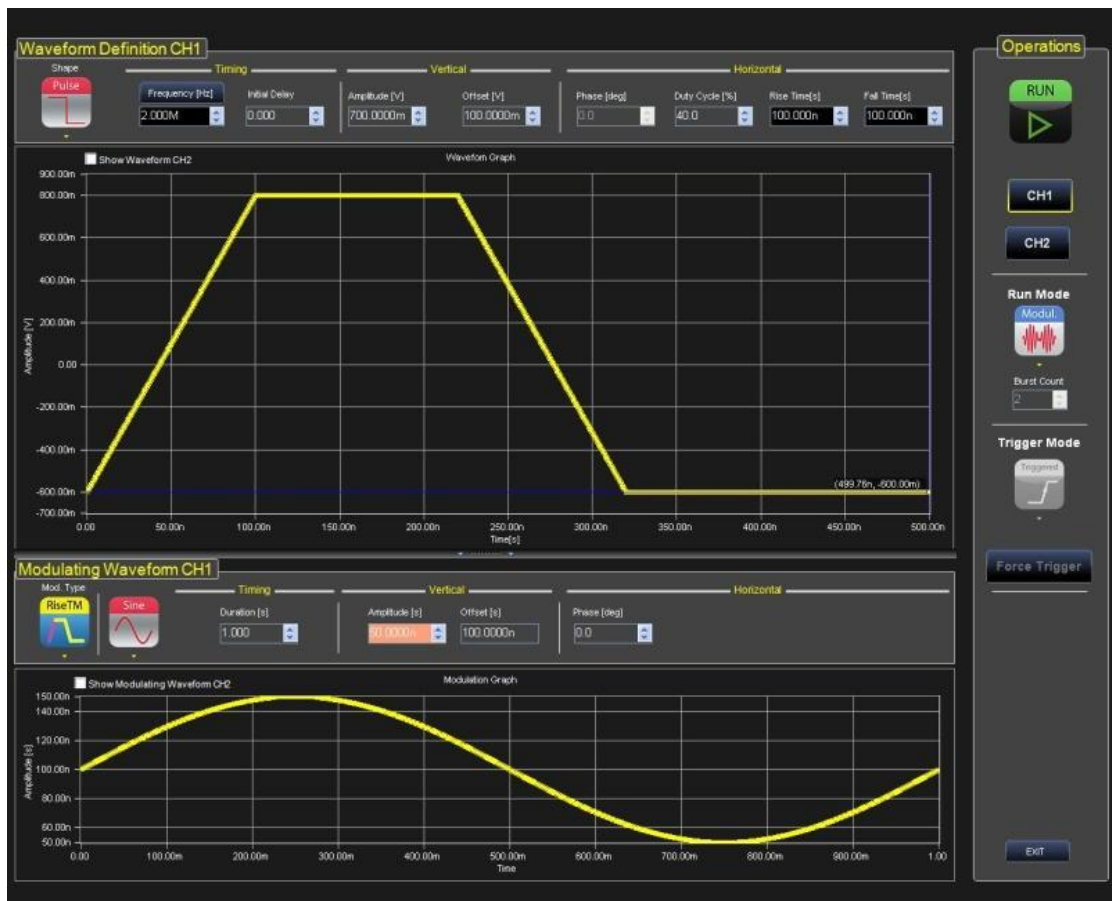


Рис 3.3 Скан екрану інтерфейсу функціонального генератора АКІП-3412

Інтерфейс генераторів являє собою уніфіковану програму, яка аналогічна з керуючою програмою інших приладів на базі ПК, наприклад ArbStudio від компанії Teledyne LeCroy. Для простоти управління або доступу до різних просунутих функцій управління розділено на різні режими: простий функціональний генератор, формування складних довільних форм, генератор на принципі прямого цифрового синтезу (необхідний для формування різних аналогових модуляцій), генератор послідовностей.

Основні характеристики:

- Частота дискретизації в реальному часі 2,5 ГГц
- Дозвіл ЦАП 14 біт

- Смуга пропускання 1 ГГц
- Довга пам'ять: 64 МБ / канал
- Канали
- Прямий вихід ЦАП - зв'язок по входу DC:
- - 1,6 ВПК-пік (диференційний режим) / 0,8 ВПК-пік (вихід із загальною землею).
- Смуга частот > 1 ГГц
- ВЧ вихід - зв'язок по входу AC:
- 10 дБм ... +10 дБм (диференційний режим)
- Смуга частот > 1 ГГц
- Вихід DC - зв'язок по входу DC:
- 4 ВПК-пік (диференційний режим) / 2 ВПК-пік (вихід із загальною землею).
- Смуга частот > 600 МГц
- Гармонійні спотворення: <-65 дБн
- Негармонійні спотворення: <-74 дБн (1 кГц - 1 ГГц
- Мультиканальна синхронізація: компенсація фазового зсуву з дозволом 10 пс
- Генератор послідовностей 16/32 біт @ 1250/625 МБ

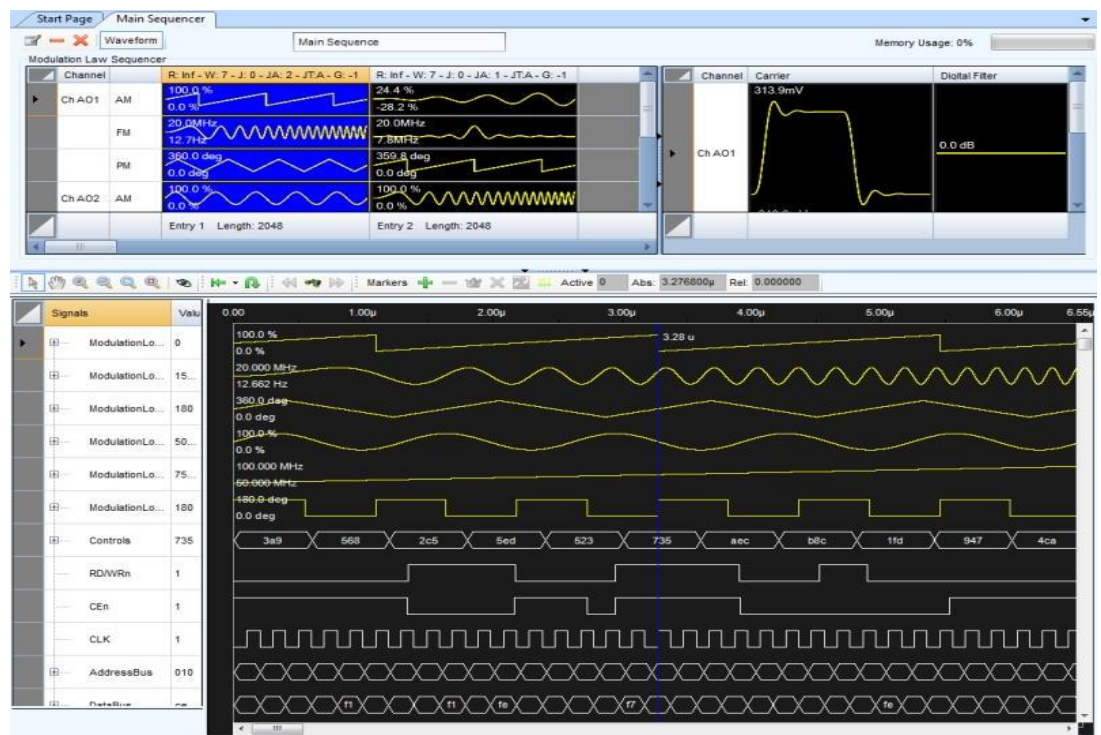


Рис 3.4 Функціональний генератор АКИП-3412 в роботі

Генератори АКИП-3412 незамінні, якщо потрібно формування дійсно складного за структурою сигналу, який може використовуватися для емуляції

різних технологічних процесів в телекомунікації, в протоколах послідовної передачі, для навчання в навчальних закладах або для наукових досліджень.

ВИСНОВКИ

- в роботі було встановлено задачу створення на сучасній елементній базі функціонального генератору. Для цього в першому роді був проведений аналіз схемотехнічних рішень, будови і керування, що застосовується у сучасних радіовимірювальних приладах. В залежності від поставлених задач схемотехніка генератору будується на дискретних елементах (транзистори), елементах середнього ступеню інтеграції (мікросхеми), великі інтегральні схеми (ВІС), контролери і комп'ютеризовані системи;
- за результатами аналізу вибрано раціональне технічне рішення по створенню генератору з достатньо широкою смугою частот, квазисенсорним керуванням і використанням матричних індикаторів в пристрої відображення інформації. На основі обраного рішення проведений розрахунок основних електронних вузлів в другому розділі;
- третій розділ присвячений перспективним розробкам даного виду техніки. Представлені рішення з електронного керування, а також з використання комп'ютерних систем в якості універсальних радіовимірювальних приладів, де, зокрема, крім функціонального генератору можна також реалізувати функції осцилографу і аналізатору спектру.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ноткин Л.Р. Функциональные генераторы и их применение. – М. Радио и связь, 1983
2. У. Титце К. Шенк Полупроводниковая схемотехника. Перевод с немецкого М.: «МИР». 1982
3. Интегральные микросхемы. Справочник Под редакцией Б.В. Тарабрина М.: «Радио и связь», 1983
4. Зубчук В.И. и др. Справочник по цифровой схемотехнике. – К. Техника, 1990.
5. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги: Справочник. Том 7./А. В. Нефедов. - М.:ИП РадиоСофт, 1998г. - 640с.:ил.
6. Отечественные микросхемы и зарубежные аналоги Справочник. Перельман Б.Л., Шевелев В.И. "НТЦ Микротех", 1998г.,376 с. - ISBN-5-85823-006-7
7. Щербаков В.И., Грездов Г.И. Электронные схемы на операционных усилителях. Справочник. - Киев: Техніка, 1983. -213с.
8. Шустов М. А., Схемотехника. 500 устройств на аналоговых микросхемах. — СПб.: Наука и Техника, 2013. —352 с.
9. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. — М. : ДМК Пресс, 2009. — 384 е., ил.
10. Зельдин Е.А. Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре.– Л: Энергоатомиздат, 1986.- 280 с.
11. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников // – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 302 с.
12. Алексенко А. Г. Применение прецизионных аналоговых ИС / А. Г. Алексенко, Е. А. Коломбет, Г. И. Стародуб //– М., Советское радио, 1980. –221с.
13. Сташин В.В., Урусов А.В., Мологонцева О.Ф. Проектирование цифровых устройств на однокристалльных микроконтроллерах. - М: Энергоатомиздат, 1990. – 224 с.

14. Интегральные микросхемы. Справочник. Под редакцией Б.В. Тарабрина М.: “Радио и связь”, 1983
15. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги: Справочник. Том 7./А. В. Нефедов. - М.:ИП “РадиоСофт”, 1998г. - 640с.:ил.
16. Отечественные микросхемы и зарубежные аналоги. Справочник. Б.Л. Перельман, В.И. Шевелев "НТЦ Микротех", 1998г.,376 с. - ISBN-5-85823-006-7
17. ГΥК М. Интерфейсы ПК. Справочник: СПб: ЗАО «Издательство «Питер», 1999 – 416 с
18. Смит Джек. Сопряжение компьютеров с внешними устройствами. Уроки реализации: Пер.с англ. – М.: Мир, 2000. — 266с., ил.
19. Мячев А.А. Интерфейсы средств вычислительной техники. Энциклопедический справочник. М.: Радио и связь, 1993. С. 4.
20. Методичні рекомендації до виконання курсової роботи і ОДЗ з дисципліни “Електронні системи” для студентів спеціальності 6.05080201– електронні прилади та пристрої денної та заочної форм навчання. Конотоп, КІ СумДУ, 2016 р, – 19с
21. http://radio-stv.ru/radio_tehnologii/izuchenie-radio-programm/kompyuter-ostsillograf-generator
22. https://prist.ru/news/generator_signalov_proizvolnoy_formy_na_baze_pk_s_ra_zresheniem_14_bit/
23. <https://cxem.net/software/sweepgen.php>
24. <http://heliso.tripod.com/download/generator/dsg.htm>