

УДК 534.08

С.М. Лісовець, к.т.н., доц.

## ФОРМУВАННЯ ПАКЕТІВ СИНУСОЇДАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ НА П'ЄЗОКЕРАМІЧНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУ

Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, [ser\\_lis@voliacable.com](mailto:ser_lis@voliacable.com)

*Розроблено засіб формування пакетів синусоїдальних коливань на п'єзокерамічному перетворювачі методом прямого цифрового синтезу із застосуванням мікроконтролера ATmega328, генератора сигналів синусоїдальної форми AD9833 і операційного підсилювача PA75. Показано, що застосування мікроконтролера дозволяє формувати синусоїдальні коливання з довільною частотою в заданому діапазоні частот і з довільною початковою фазою, а також формувати з цих коливань пакети із заданою кількістю повних коливань і з заданим періодом, забезпечуючи при цьому мінімальний рівень гармонічних викривлень синусоїдального сигналу.*

**Ключові слова:** відношення сигнал/шум, гармонічні викривлення, пакети синусоїдальних коливань, п'єзокерамічний перетворювач, пружна хвиля, прямий цифровий синтез, спектральна чистота.

### Вступ

Пружні хвилі дуже широко застосовуються в різних областях для визначення якісних і кількісних властивостей матеріалів, для яких вони є зондуєчими. Це стосується, зокрема, дефектоскопії матеріалів, яка полягає у випроміненні в матеріал пружних коливань і відповідно в аналізі коливань, які пройшли через такий матеріал. Аналогічна задача розв'язується при аналізі параметрів таких матеріалів, як тканини, трикотаж або неткані матеріали тощо. До параметрів цих матеріалів, які можна визначити акустичними засобами, відносяться товщина, поверхнева щільність, ступінь розтягнення тощо.

Пружні коливання, які випромінюються в матеріал, можуть мати складну форму. В переважній більшості випадків вони представляють собою пакети (пачки) імпульсів, огинаючи яких можна описати певною математичною функцією (наприклад, загасаючою, експоненційною, дзвоноподібною, сталою тощо). Сформувані такі коливання методами традиційної електроніки також досить складно. Особливо це стосується випадку, коли необхідно отримати коливання на точно заданій частоті або з точно заданою амплітудою. Дуже важливим також є випадок, коли необхідно отримати спектрально-чисті коливання – тобто коливання практично без додаткових гармонічних складових.

Розв'язанням поставленої задачі зазвичай є застосування так званих генераторів сигналів довільної форми. Такі генератори дозволяють отримувати сигнали практично будь-якої форми, будуючи їх по окремих точках (застосовуючи, наприклад, 8192 точки або 16384 точки). Основним недоліком таких генераторів є занадто складна схемотехніка і досить велика вартість (особливо при генерації сигналів на частотах більше (10...20) МГц). Як показують статистичні дані, зазвичай в матеріал випромінюються гармонічні (синусоїдальні) коливання в вигляді кількох цілих коливань, утворюючи таким чином пакети (пачки) імпульсів.

Тому для генерації саме синусоїдальних коливань з високою стабільністю частоти і амплітуди фірмою Analog Devices, Inc. була розроблена мікросхема AD9833. Вона представляє собою генератор сигналів синусоїдальної або трикутної форми, які можна отримати методом прямого цифрового синтезу DDS (Direct Digital Synthesizers).

### Постановка завдання

Основне завдання полягало в тому, щоб сформувати на п'єзокерамічному перетворювачі пакети синусоїдальних коливань, які б мали стабільну частоту і амплітуду. Ще однією умовою була можливість керування частотою і амплітудою такого генератора за допомогою мікроконтролера. Для виконання всіх умов завдання мікросхема AD9833 підходила практично за всіма параметрами. Частота  $f$  синусоїдального сигналу, який формувала мікросхема AD9833, визначалася за формулою

$$f = \frac{\Delta_{\text{Frequency}}}{2^{28}} f_{\text{MCLK}}, \quad (1)$$

де  $f_{\text{MCLK}}$  – частота сигналу, який надходив на вивід MCLK мікросхеми AD9833;  $\Delta_{\text{Frequency}}$  – параметр, який міг приймати значення в діапазоні від 0 до  $2^{28} - 1$ .

Параметр  $\Delta_{\text{Frequency}}$  зберігався в вигляді 28 біт в регістрі FREQ0 або регістрі FREQ1 (на вибір). Крім того, мікросхема AD9833 дозволяла задавати початкову фазу  $\phi$  сигналу в діапазоні від 0 до  $2\pi$ , яка визначалася за формулою

$$\varphi = \frac{2\pi}{2^{12}} \Delta_{\text{Phase}}, \quad (2)$$

де  $\Delta_{\text{Phase}}$  – параметр, який міг приймати значення в діапазоні від 0 до  $2^{12} - 1$ .

Параметр  $\Delta_{\text{Phase}}$  зберігався в вигляді 12 біт в регістрі PHASE0 або регістрі PHASE1 (на вибір). Загалом вихідний сигнал  $U_{\text{OUT}}(t)$  визначався за формулою

$$U_{\text{OUT}}(t) = 18 U_{\text{REF}} \frac{R_{\text{LOAD}}}{R_{\text{SET}}} \left( 1 + \sin \left( 2\pi \left( \frac{\text{FREQREG}}{2^{28}} f_{\text{MCLK}} t + \frac{\text{PHASEREG}}{2^{12}} \right) \right) \right), \quad (3)$$

де  $U_{\text{REF}}$  – напруга внутрішнього джерела напруги,  $U_{\text{REF}} = 1,2 \text{ В} \pm 7\%$ ;  $R_{\text{SET}}$  – внутрішній опір цифро-аналогового перетворювача,  $R_{\text{SET}} = 6800 \text{ Ом}$ ;  $R_{\text{LOAD}}$  – опір внутрішнього навантаження,  $R_{\text{LOAD}} = 200 \text{ Ом}$ ; FREQREG – уміст регістру FREQ0 або FREQ1; уміст регістру PHASE0 або PHASE1.

Таким чином, амплітуда вихідного сигналу  $U_{\text{OUT}}(t)$  складала приблизно

$$18 U_{\text{REF}} \frac{R_{\text{LOAD}}}{R_{\text{SET}}} = 18 \cdot 1,2 \text{ В} \frac{200 \text{ Ом}}{6800 \text{ Ом}} \approx 0,64 \text{ В}, \quad (4)$$

що відповідало значенню  $\approx 0,6 \text{ В}$ , наведеному в специфікації на мікросхему AD9833.

Важливою характеристикою мікросхеми AD9833 були загальні гармонічні викривлення (Total Harmonic Distortion – THD), які визначалися за наступною формулою:

$$\text{THD} = 20 \log \left( \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2 + U_6^2}}{U_1} \right), \quad (5)$$

де  $U_1$  – амплітуда першої гармонічної складової вихідного сигналу;  $U_2, U_3, U_4, U_5, U_6$  – амплітуди відповідно з другої по шосту гармонічних складових вихідного сигналу.

Гармонічні складові вихідного сигналу, починаючи з  $U_7$ , мали таке мале значення, що при розрахунку THD їх можна було не враховувати.

Ще однією важливою характеристикою мікросхеми AD9833 було відношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio – SNR), який визначався як відношення середньоквадратичного значення вихідного сигналу (першої гармонічної складової) до середньоквадратичного значення всіх спектральних складових вище частоти Найквіста (яка за визначенням складала половину частоти першої гармонічної складової) за виключенням перших шести гармонічних складових і постійної напруги. Значення SNR становило не менше 50 дБ, що забезпечувало досить непогану спектральну чистоту вихідного сигналу мікросхеми AD9833.

Так як мікросхема AD9833 формувала вихідний сигнал відповідно до тактових сигналів, які подавалися на її вхід MCLK, то ці тактові сигнали через паразитні внутрішні зв'язки мікросхеми AD9833 потрапляли на її вихід (хоча і в дуже ослабленому вигляді).

В якості п'єзокерамічного перетворювача застосовувався перетворювач з каталоговим номером 10-3235 виробництва фірми APC International, Ltd., призначений як для випромінювання, так і для прийому пружних коливань в повітряне середовище. Тобто такий перетворювач міг одночасно виступати і як випромінювач, і як приймач пружних коливань. Крім типових застосувань, такий перетворювач можна було застосовувати в системах дистанційного (через повітряне середовище) вимірювання і контролю параметрів різних технологічних процесів.

П'єзокерамічний перетворювач 10-3235 характеризувався частотою резонансу  $(40 \pm 1) \text{ кГц}$ , при цьому ширина діаграми спрямованості на рівні  $-6 \text{ дБ}$  становила  $\pm 1 \text{ кГц}$ . Перетворювач мав зовнішній діаметр 25,1 мм. Максимальне значення напруги, яку можна було подавати на такий перетворювач, становило 20 В. Тому можна було прийняти (з невеликим запасом по напрузі), що дійсне значення синусоїдальної напруги в пакетах коливань не повинно перевищувати 10 В.

Програмування мікросхеми AD9833 здійснювалося по інтерфейсу SPI, який визначався трьома виводами цієї мікросхеми: SDATA, SCLK і FSYNC. Сигнал SDATA призначався для побітної передачі даних розміром 16 біт. Сигнал SCLK представляв собою сигнал синхронізації, і дані передавалися побітно в мікросхему AD9833 по спадаючому фронту цього сигналу. Сигнал FSYNC призначався для початку

передачі даних в мікросхему AD9833 – якщо він приймав значення лог. 0, то це свідчило про те, що дані вже починають передаватися.

**Розв’язок поставленого завдання.** Спрощена принципова схема розробленого пристрою для формування пакетів синусоїдальних сигналів на п’єзокерамічному перетворювачі методом прямого цифрового синтезу показана на рис. 1.

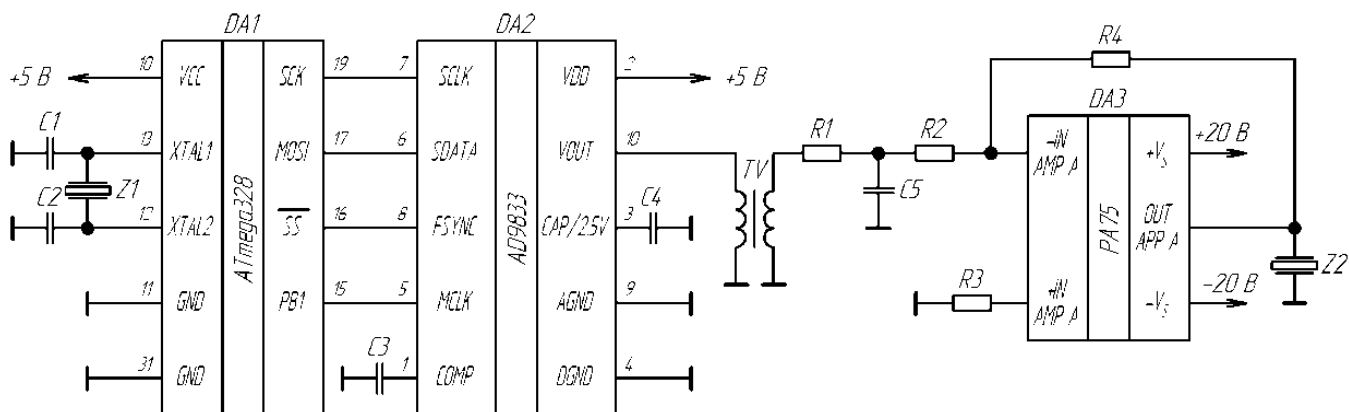


Рис. 1. Спрощена принципова схема пристрою для формування пакетів синусоїдальних сигналів на п’єзокерамічному перетворювачі

В якості мікроконтролера DA1 застосовувався ATmega328 виробництва Atmel. Технологічні конденсатори C1 і C2 мали ємності по 18 пФ, конденсатор C3 – 0,01 мкФ, конденсатор C4 – 0,1 мкФ. Спеціально підібраний резонатор Z1 типу PK169 ОД0.338.017 ТУ мав резонансну частоту 16,777216 МГц (або  $2^{24}$  Гц). Для подачі тактового сигналу на вивід MCLK мікросхеми DA2 застосовувався вивід PB1 порту PB мікросхеми DA1. Особливості апаратно-програмної архітектури мікросхеми DA1 полягали в тому, що для формування одного тактового імпульсу на виводі PB1 потребувало чотирьох тактових імпульсів резонатора Z1, тобто частота  $f_{MCLK}$  тактового сигналу на виводі PB1 мала наступне значення:

$$f_{MCLK} = \frac{16,777216 \text{ МГц}}{4} = 4,194304 \text{ МГц}. \quad (6)$$

Так як припускалося, що початкова фаза  $\varphi$  сигналу могла дорівнювати нулю, то було прийнято заносити в регістри PHASE0 або PHASE1 нульові значення. Крім того, відповідно до формули (1) параметр  $\Delta_{\text{Frequency}}$  становив

$$\Delta_{\text{Frequency}} = \frac{f}{f_{MCLK}} \cdot 2^{28} = \frac{40000 \text{ Гц}}{4194304 \text{ Гц}} \cdot 2^{28} = 2560000. \quad (7)$$

Це значення заносилося в регістри FREQ0 і FREQ1. Таким чином, формула (3) приймала наступний вигляд:

$$U_{\text{OUT}}(t) = 0,64(1 + \sin(2\pi \cdot 40000t)). \quad (8)$$

Частота сигналу, сформованого методом прямого цифрового синтезу, становила 40000 Гц, при цьому частота  $f_{MCLK}$  тактового сигналу становила 4194304 Гц. Таким чином, для формування одного періоду сигналу частотою 40000 Гц необхідно було

$$\frac{4194304 \text{ Гц}}{40000 \text{ Гц}} \approx 104 \quad (9)$$

періоди сигналу частотою 4194304 Гц. Тобто четверта частина сигналу частотою 40000 Гц (збільшення сигналу від нульового до максимального значення або навпаки) формувалася за

$$\frac{104}{4} \approx 21 \quad (10)$$

період сигналу частотою 4194304 Гц. Таке співвідношення забезпечувало досить низький рівень гармонічних викривлень сигналу частотою 40000 Гц (менше 1%) і забезпечувало його спектральну чистоту, яка була прийнятною при формуванні пакетів синусоїдальних сигналів на п'єзокерамічному перетворювачі.

Ініціалізація і робота мікросхеми AD9833 в спрощеному вигляді полягала в наступному. Записуванням лог. 1 в біт D8 регістра керування Control Register мікросхеми AD9833 переводилася в режим скидання. При цьому на виході VOUT мікросхеми AD9833 встановлювалася напруга, яка дорівнювала приблизно

$$\frac{0,64 \text{ В}}{2} = 0,32 \text{ В}. \quad (11)$$

Навіть якщо на вхід MCLK мікросхеми AD9833 подавався тактовий сигнал, формування на її виході VOUT синусоїдального сигналу буде відсутнім. Після запису лог. 1 в біт D8 регістра керування Control Register мікросхеми AD9833 через приблизно 7 тактів тактового сигналу починала формувати на своєму виході VOUT синусоїдальний сигнал.

Нехай стоїть задача сформувати на виході VOUT пакет з п'яти синусоїдальних коливань, як показано на рис. 2.

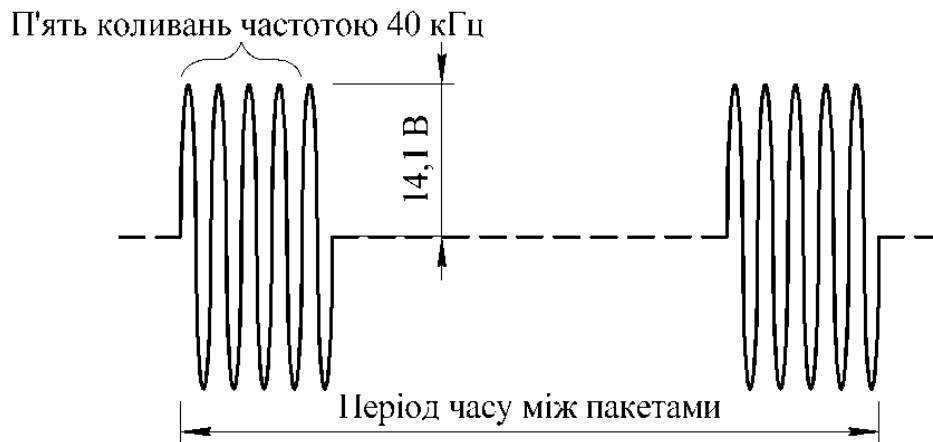


Рис. 2. Пакет з п'яти синусоїдальних коливань

Відповідно до формули (9) і з урахуванням додаткових 7 тактів тактового сигналу на вхід MCLK мікросхеми AD9833 необхідно подати

$$5 \frac{4194304 \text{ Гц}}{40000 \text{ Гц}} + 7 \approx 532 \quad (12)$$

тактових імпульсів. Після цього мікросхеми AD9833 може знову бути переведена в режим скидання. А після проходження періоду часу, який дорівнює періоду часу між пакетами синусоїдальних коливань, в біт D8 регістра керування Control Register мікросхеми AD9833 знову записується лог. 1, і процес формування пакета синусоїдальних коливань повторюється.

Так як мікросхеми AD9833 живиться від однополярного джерела напруги 5 В, то на її виході при формуванні пакетів синусоїдальних коливань завжди присутня постійна складова, яка дорівнює приблизно 0,32 В (див. формулу (11)). Для усунення цієї складової застосовується трансформатор TV, який мав коефіцієнт трансформації 1:1. Крім того, трансформатор TV забезпечував гальванічну розв'язку між мікросхемами DA2 і DA3.

Так як синусоїдальний сигнал мікросхеми AD9833 формує методом прямого цифрового синтезу, то на її виході завжди є певні високочастотні шуми. Відповідно до цього використовується фільтр нижніх частот R1–C5, який призначений для обмеження спектру вихідного сигналу мікросхеми AD9833 на рівні приблизно 400 кГц. Тому опір резистора R1 становив 6,8 кОм, а ємність C5 становила 360 пФ.

В якості операційного підсилювача DA3 застосовувався PA75 виробництва Apex Microtechnology, який був спеціально розроблений для підсилення сигналів звукових і ультразвукових частот. Його особливостями були власні гармонічні викривлення THD < 0,02% і типовий коефіцієнт підсилення 40 дБ на частоті 1,4 МГц.

Операційний підсилювач DA3 при максимальній напрузі живлення  $\pm 20$  В міг забезпечити діюче (ефективне) значення синусоїдального сигналу на п'єзокерамічному перетворювачі Z2 на рівні не більше 10 В (при збільшенні цього значення могли суттєво зрости його власні гармонічні викривлення THD). Такий рівень синусоїдального сигналу на п'єзокерамічному перетворювачі Z2 зазвичай може забезпечити вимірювання відбитих від тканин, трикотажу або нетканих матеріалів пружних хвиль. Але для вимірювання пружних хвиль, які пройшли через такий матеріал (так як в товщі матеріалу пружні хвилі суттєво поглинаються і їх амплітуда зменшується), такого рівня синусоїдального сигналу на п'єзокерамічному перетворювачі Z2 буде недостатньо.

Тому за необхідністю тип операційного підсилювача DA3 міг бути без будь-яких складностей замінений на, наприклад, PA90 або PA92 виробництва Apex Microtechnology із максимальною напругою живлення  $\pm 200$  В і приблизно такими ж самими значеннями гармонічних викривлень THD і типового коефіцієнта підсилення.

Із застосуванням резисторів R2 і R3 опором 6,8 кОм і резистора R4 опором 150 кОм на операційному підсилювачі DA3 було побудовано підсилювач потужності з коефіцієнтом підсилення

$$\frac{150 \text{ кОм}}{6,8 \text{ кОм}} \approx 22, \quad (13)$$

який дозволив отримувати на п'єзокерамічному перетворювачі Z2 амплітудне значення синусоїдального сигналу

$$0,64 \text{ В} \cdot 22 \approx 14,1 \text{ В}, \quad (14)$$

що відповідало діючому (ефективному) значенню синусоїдального сигналу приблизно 10,0 В.

Замінивши постійний резистор R4 змінним резистором такого самого або трохи більшого номіналу, можна було змінювати в невеликих межах амплітудне значення синусоїдального сигналу на п'єзокерамічному перетворювачі Z2.

Візуальне спостереження пакетів синусоїдальних коливань, які подаються на п'єзокерамічний перетворювач Z2, здійснювалося за допомогою аналогового осцилографа С1-77. В результаті було отримано пакети з п'яти повних синусоїдальних коливань практично без будь-яких спотворень форми цих синусоїдальних коливань.

### Висновки

В результаті проектування пристрою для формування пакетів синусоїдальних коливань на п'єзокерамічному перетворювачі методом прямого цифрового синтезу із застосуванням мікроконтролера ATmega328, генератора сигналів синусоїдальної форми AD9833 і операційного підсилювача PA75 було отримано можливість формувати пакети синусоїдальних коливань із заданими параметрами, забезпечуючи при цьому мінімальний рівень гармонічних викривлень синусоїдального сигналу.

Застосування спеціалізованих мікросхем дозволяє забезпечити як високі метрологічні характеристики пристрою, так і невисоку вартість пристрою внаслідок зведення до мінімуму застосування додаткових електронних компонентів.

### Список літературних джерел

1. Кузьминов А. Низкочастотный генератор на основе синтезатора частоты AD9833. Часть 1. Описание аппаратных средств и настройка генератора / А. Кузьминов // Современная электроника. – 2013. – № 8. – С. 58–65.
2. Кузьминов А. Низкочастотный генератор на основе синтезатора частоты AD9833. Часть 2. Программные средства и результаты испытаний / А. Кузьминов // Современная электроника. – 2013. – № 9. – С. 50–55.
3. Ревич Ю.В. Практическое программирование микроконтроллеров Atmel AVR на языке ассемблера. – 3-у изд., испр. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 368 с: ил. – (Электроника).
4. Прокопенко В.С. Программирование микроконтроллеров ATMEЛ на языке С. – К.: “МК-Пресс”, СПб.: “КОРОНА-ВЕК”, 2012. – 320 с., ил.
5. Белов А.В. Разработка устройств на микроконтроллерах AVR: шагаем от «чайника» до профи. Книга + видеокурс. – СПб.: Наука и Техника, 2013. – 528 с.: ил. + CD.