

## СЕКЦІЯ 3

Прикладна гідроаеромеханіка і  
мехатроніка

УДК 681.5.013

**Расширение динамического диапазона ультразвуковых генераторов в  
мехатронных системах управления пьезопреобразователями****Мовчанюк А.В., Луговской А.Ф., Фесич В.П.**

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

***Аннотация:** Ультразвуковые приводы широко используются в мехатронных системах. Они могут работать в квазистатическом и резонансном режиме работы. В технологических целях наиболее рационально использовать резонансный режим работы. В резонансном режиме частота питающего электрического напряжения близка к частоте собственных механических колебаний ультразвукового привода. При этом амплитуда механических колебаний пропорциональна величине приложенного электрического напряжения. Для построения эффективных с энергетической точки зрения систем управления транзисторы выходного каскада ультразвукового генератора должны работать в ключевом режиме. Для формирования гармонического сигнала можно использовать ШИМ и согласующий фильтр, уменьшающий амплитуду высших гармоник. Анализ выражений для амплитуды гармоник в спектре ШИМ сигнала показывает, что амплитуду первой гармоники можно изменять коэффициентом заполнения и амплитудой питающего напряжения. При изменении коэффициента заполнения нарушается линейность, что сужает динамический диапазон. Одновременное изменение напряжения и коэффициента заполнения устраняет этот недостаток. Приведена структурная схема ультразвукового генератора с широким динамическим диапазоном линейной области регулирования. Указано, что такая система будет иметь несколько ниже КПД.*

***Ключевые слова:** ультразвук; пьезопреобразователь; ультразвуковой генератор; ШИМ; регулирование амплитуды*

Ультразвуковые пьезопроводы широко используются в качестве электро-механических преобразователей в мехатронных системах [1]. Пьезокерамика эффективно преобразовывает энергию электрического поля в энергию механических колебаний. Основной интерес представляет резонансный режим работы пьезопровода – когда частота изменения электрического поля совпадает с частотой собственных механических колебаний. При этом в достаточно широком диапазоне можно считать, что амплитуда электрических колебаний подведенного напряжения прямо пропорциональна амплитуде механических колебаний. Фактически управляя величиной приложенного напряжения можно управлять амплитудой механических колебаний. Отметим, что одновременно должен поддерживаться резонансный режим работы. Непосредственное формирование синусоидального напряжения не эффективно с энергетической точки зрения, поэтому более рационально использовать дискретные сигналы, при которых транзисторы ультразвукового генератора работают в ключевом режиме. При этом для управления пьезопреобразователем используют ШИМ сигналы (рис.1) [2]. Высшие гармоники в спектре такого сигнала подавляются с помощью согласующих фильтров [3,4], которые одновременно компенсируют емкостную составляющую тока через пьезопреобразователь.

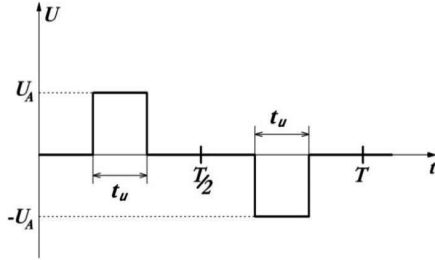


Рис.1. Временная диаграмма ШИМ сигнала

Амплитуда  $n$ -й гармоники в спектре ШИМ сигнала, а так же амплитуда 1-й гармоники, могут быть рассчитаны как:

$$U_n = \frac{4}{\pi \cdot n} \cdot U_A \cdot \sin\left(\frac{\gamma \cdot n \cdot \pi}{2}\right) \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

$$\gamma = \frac{2 \cdot t_{II}}{T},$$

$$U_1 = U_A \cdot \frac{4}{\pi \sqrt{2}} \cdot \sin\left(\frac{\gamma \cdot \pi}{2}\right).$$

Как видим, амплитуда первой гармоники зависит одновременно от амплитуды  $U_A$  питающего напряжения и  $\gamma$  коэффициента заполнения управляющего напряжения. При изменении  $\gamma$  одновременно изменяется и амплитуды высших гармоник в спектре сигнала. В результате регулировать амплитуду можно изменением скважности (рис.2а) и одновременным изменением скважности и амплитуды (рис.2б).

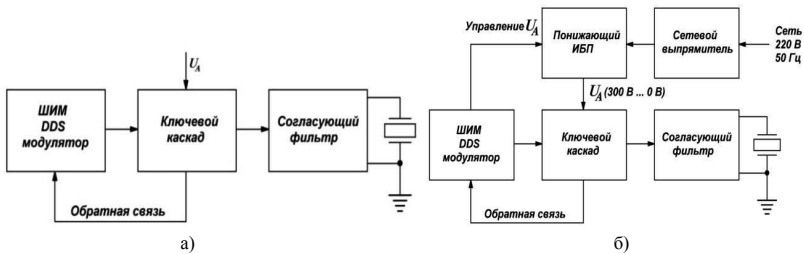


Рис.2. Ультразвуковой генератор с ШИМ с регулируемым коэффициентом заполнения (а) и расширенным динамическим диапазоном (б)

Одновременное изменение скважности и амплитуды имеет свои преимущества и недостатки. К недостаткам следует отнести уменьшение общего КПД системы и за появления еще одного узла. Основным достоинством является возможность работы с коэффициентом заполнения, при котором минимизируется амплитуда высших гармоник в спектре сигнала. Одновременное изменение скважности и амплитуды питающего напряжения значительно расширяет динамический диапазон области в которой амплитуда первой гармоники будет линейно зависеть от скважности и амплитуды.

## Dynamic range extension of ultrasonic generators in mechatronic control systems of piezoceramic transducers

Movchanuk A., Lugovsky O., Fesich V.

**Annotation:** Ultrasonic drives are widely used in mechatronic systems. They can work in quasi static and resonant mode of operation. For technological purposes, the most rational use of the resonant mode of operation. In resonant mode, the frequency of the supply voltage is close to the frequency of the own mechanical oscillations of the ultrasonic drive. In this case, the amplitude of mechanical oscillations is proportional to the amplitude of the applied electrical voltage. To build energy-efficient control systems, the transistors of the output stage of an ultrasonic generator must operate in a key mode. For the formation of a harmonic signal, you can use the PWM and matching filter, which reduces the amplitude of higher harmonics. Analysis of the expressions for the amplitude of the harmonics in the PWM signal spectrum shows that the amplitude of the first harmonic can be changed by the fill factor and the amplitude of the supply voltage. When the fill factor changes, linearity is disturbed, which limits the dynamic range. Simultaneous changes in voltage and duty cycle eliminate this disadvantage. A block diagram of an ultrasonic generator with a wide dynamic range of a linear control range is given. It is indicated that such a system will have a slightly lower efficiency

**Keywords:** ultrasonic, piezoceramic transducer, ultrasonic generator, PWM, amplitude control

## Розширення динамічного діапазону ультразвукових генераторів у мехатронних системах керування п'єзоперетворювачами

Мовчанюк А.В., Луговской А.Ф., Фесич В.П.

**Анотация:** Ультразвукові приводи широко використовуються в мехатронних системах. Вони можуть працювати в квазістатичному і резонансному режимі роботи. У технологічних цілях найбільш раціонально використовувати резонансний режим роботи. У резонансному режимі частота електричної напруги живлення близька до частоти власних механічних коливань ультразвукового приводу. При цьому амплітуда механічних коливань пропорційна величині прикладеної електричної напруги. Для побудови ефективних із енергетичної точки зору систем управління транзистори вихідного каскаду ультразвукового генератора повинні працювати в ключовому режимі. Для формування гармонійного сигналу можна використовувати ШІМ і узгоджувальний фільтр, що зменшує амплітуду вищих гармонік. Аналіз виразів для амплітуди гармонік в спектрі ШІМ сигналу показує, що амплітуду першої гармоніки можна змінювати коефіцієнтом заповнення і амплітудою напруги живлення. При зміні коефіцієнта заповнення порушується лінійність, що звужує динамічний діапазон. Одночасна зміна напруги і коефіцієнта заповнення усуває цей недолік. Наведено структурну схему ультразвукового генератора з широким динамічним діапазоном лінійної області регулювання. Зазначено, що така система буде мати трохи нижче ККД.

**Ключові слова:** ультразвук; п'єзоперетворювач; ультразвуковий генератор; ШІМ; регулювання амплітуди

### Список литературы:

1. Gallego-Juarez J.A., Graff K.F. (2015) Introduction to power ultrasonics. Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound. pp. 1– 6. DOI: 10.1016/B978-1-78242-028-6.00001-6.
2. Моин В. С. Стабилизированные транзисторные преобразователи / В. С. Моин — М. :Энергоатомиздат, 1986. — 376с.
3. Ye. Vistyzenko, A. Movchanyuk, I. Sushko, A. Novosad, "LL-type filter for piezoelectric transducer", Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) 2017 International Conference on, pp. 1-6, 2017. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095384
4. A. Movchanyuk, V. Fesich, I. Sushko and Y. Vistyzenko, "The research of L-type matching filter parameters," 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kiev, 2016, pp. 1-5, DOI: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739596