



УДК 621  
doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-13



Open  
Access

RESEARCH  
ARTICLE

## Методы снижения массогабаритных характеристик измерительных преобразователей

**Дмитрий Викторович Якушов**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
hammer.fate@yandex.ru

**Екатерина Анатольевна Печерская**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
iit@pnzgu.ru

**Владимир Викторович Антипенко**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
v.antipenko7@yandex.ru

**Аннотация.** Проведен сравнительный анализ методов снижения массогабаритных характеристик измерительных преобразователей за счет модуляции первичного электрического сигнала. Выявлены достоинства и недостатки каждого метода, определены ключевые особенности, оценена сложность реализации. Результат обзора позволяет подобрать оптимальный метод в зависимости от конкретной поставленной задачи, сделаны выводы.

**Ключевые слова:** модуляция, сигнал, передача, гальваническая развязка, трансформатор, точность, стабильность

**Для цитирования:** Якушов Д. В., Печерская Е. А., Антипенко В. В. Методы снижения массогабаритных характеристик измерительных преобразователей // Инжиниринг и технологии. 2024. Т. 9 (1). С. 1–4. doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-13

## Methods for reducing the weight and size characteristics of measuring transducers

**Dmitry V. Yakushov**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
hammer.fate@yandex.ru

**Ekaterina A. Pecherskaya**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
iit@pnzgu.ru

**Vladimir V. Antipenko**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
v.antipenko7@yandex.ru

**Abstract.** A comparative analysis of methods for reducing the weight and size characteristics of measuring transducers by modulating the primary electrical signal has been carried out. The advantages and disadvantages of each method are identified, key features are identified, and the complexity of implementation is assessed. The result of the review allows you to select the optimal method depending on the specific task at hand, and conclusions are drawn.

**Keywords:** modulation, signal, transmission, galvanic isolation, transformer, accuracy, stability

**For citation:** Yakushov D.V., Pecherskaya E.A., Antipenko V.V. Methods for reducing the weight and size characteristics of measuring transducers. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2024;9(1):1–4. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-13

### Введение

При осуществлении измерений в цепях с высоким потенциалом необходима гальваническая изоляция первичной (горячей) части от вторичной. Горячая часть представляет опасность для



измерительного либо управляющего оборудования, а также для обслуживающего персонала. Для реализации гальванической развязки применяют различные виды передачи энергии, отличные от электрической. К таким видам относятся оптическая (оптроны, оптоволокно), магнитная (трансформаторы), электростатическая (конденсаторы). Наиболее часто в высоковольтных цепях применяют конденсаторную либо трансформаторную гальваническую развязку ввиду низкой стоимости, простоты и надежности. Напряжение изоляции у этих видов ограничено лишь конструкцией и применяемыми материалами. Однако чем ниже измеряемая частота, тем больших габаритов требуется развязывающий элемент. Кроме того, при применении этих видов гальванической развязки становится невозможной передача постоянного напряжения. В связи с этим требуется модуляция первичного электрического сигнала по какому-либо закону и перенос на промежуточный высокочастотный сигнал. Наиболее распространенными методами модуляции являются частотно-импульсная, амплитудно-импульсная, широтно-импульсная. Каждый из этих методов обладает своими достоинствами и недостатками относительно передачи измерительного сигнала [1].

### 1. Частотно-импульсная модуляция

Частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) – это вид модуляции, при котором частота следования импульсов меняется по закону первичного электрического сигнала. Амплитуда импульсов при этом остается неизменной. Однако даже незначительные изменения амплитуды не оказывают влияния на устойчивость данного вида модуляции. Временная диаграмма такого вида изображена на рис. 1.

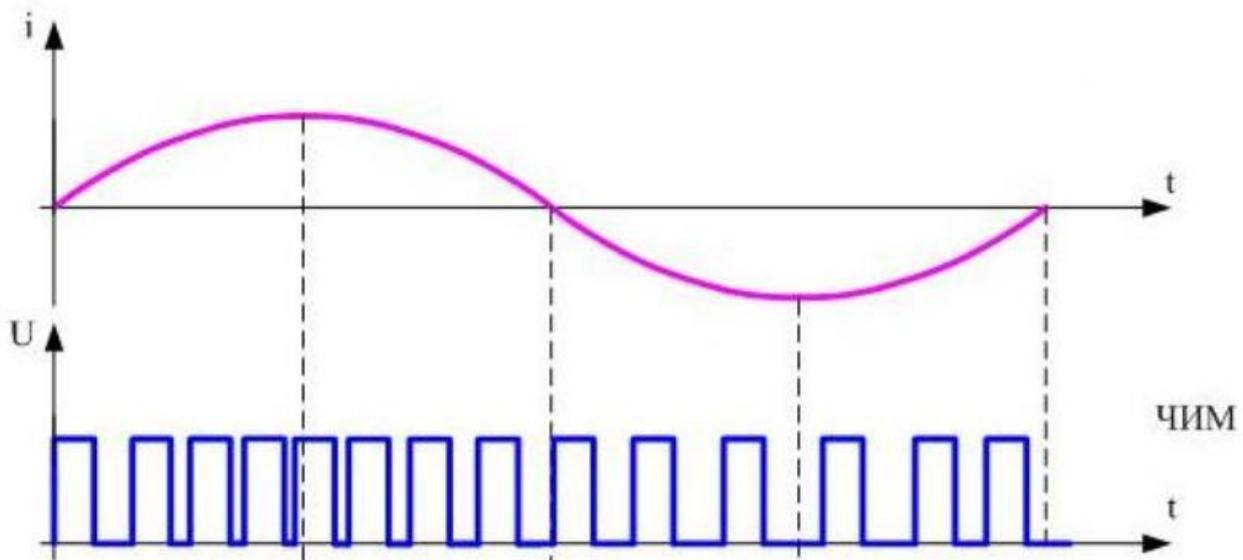


Рис. 1. Временная диаграмма ЧИМ

За счет нечувствительности демодулирующего тракта к амплитуде ЧИМ-сигнала не требуется точная передача прямоугольной формы импульсного сигнала. Ключевую роль оказывают моменты прохождения восходящего и нисходящего фронтов, исходя из временных интервалов следования фронтов можно однозначно определить частоту следования импульсов, а значит и напряжение первичного электрического сигнала [2]. В случае емкостной развязки можно применить конденсаторы в несколько раз меньшего номинала, а в случае трансформаторной развязки не требуется высокий коэффициент связи и возможна сосредоточенная намотка обмоток трансформатора. Однако в условиях плохой помеховой обстановки дрожащие фронты могут привести к ошибке демодуляции. К некорректной передаче сигнала также могут привести всплески и выбросы, образованные коммутацией силовых элементов [3]. В случае с трансформаторной развязкой весьма сложно подобрать сердечник, способный работать в широком диапазоне частот, а сужение девиации частоты ЧИМ-сигнала приводит к повышению погрешности преобразования.

### 2. Амплитудно-импульсная модуляция

Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ) – это вид модуляции, когда амплитуда импульсного сигнала изменяется по закону входного электрического сигнала, при этом частота, как правило, не меняется. Временная диаграмма такого вида изображена на рис. 2.

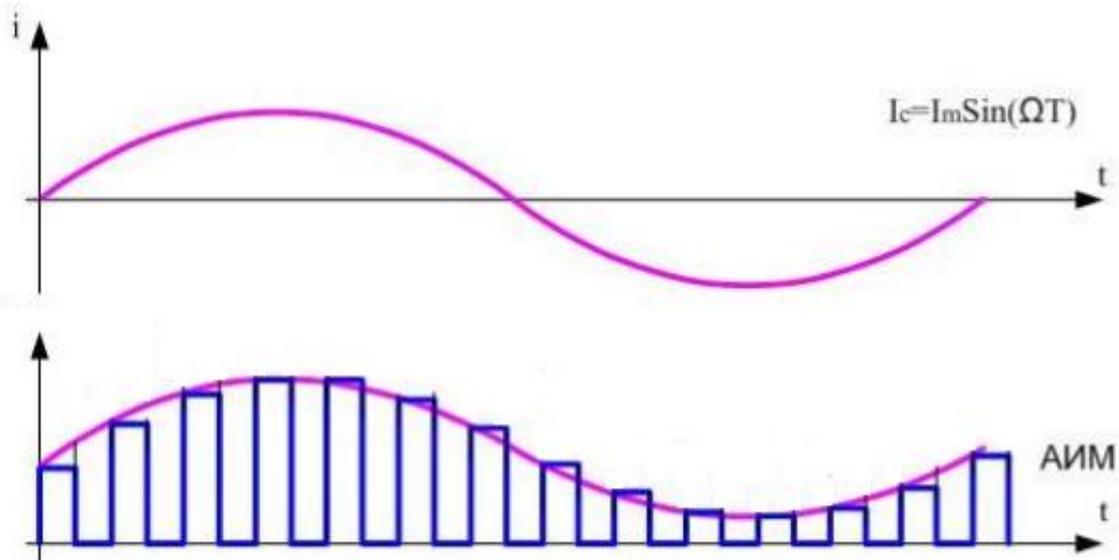


Рис. 2. Временная диаграмма АИМ

Амплитудная модуляция – это самый простой вид с точки зрения реализации. Модулятор может быть построен на аналоговых ключах, попеременно чередующих полярность подачи входного напряжения с несущей частотой. Демодулятор реализуется еще проще – это выпрямитель с фильтром низких частот. Устройства, реализованные с применением амплитудной модуляции, практически нечувствительны к коротким выбросам напряжения, все подобные коммутационные помехи успешно фильтруются [4]. Однако если частота следования помех намного выше, чем частота несущей, то это приводит к возникновению дополнительной погрешности ввиду выделения их среднего значения фильтром демодулятора. Кроме того, в случае применения трансформатора в качестве изолирующего элемента требуется высокий коэффициент связи первичной и вторичной обмоток, что накладывает ограничения на его конструкцию. Снижение коэффициента связи приводит к возникновению погрешности передаваемого сигнала и увеличению индуктивности рассеяния, выбросы которой также оказывают влияние на демодулированный сигнал.

### 3. Широтно-импульсная модуляция

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) – это вид модуляции, когда меняется коэффициент заполнения импульсного сигнала. Частота ШИМ-сигнала может менять в некоторых пределах и это не окажет негативного влияния на преобразование. Временная диаграмма такого вида изображена на рис. 3.

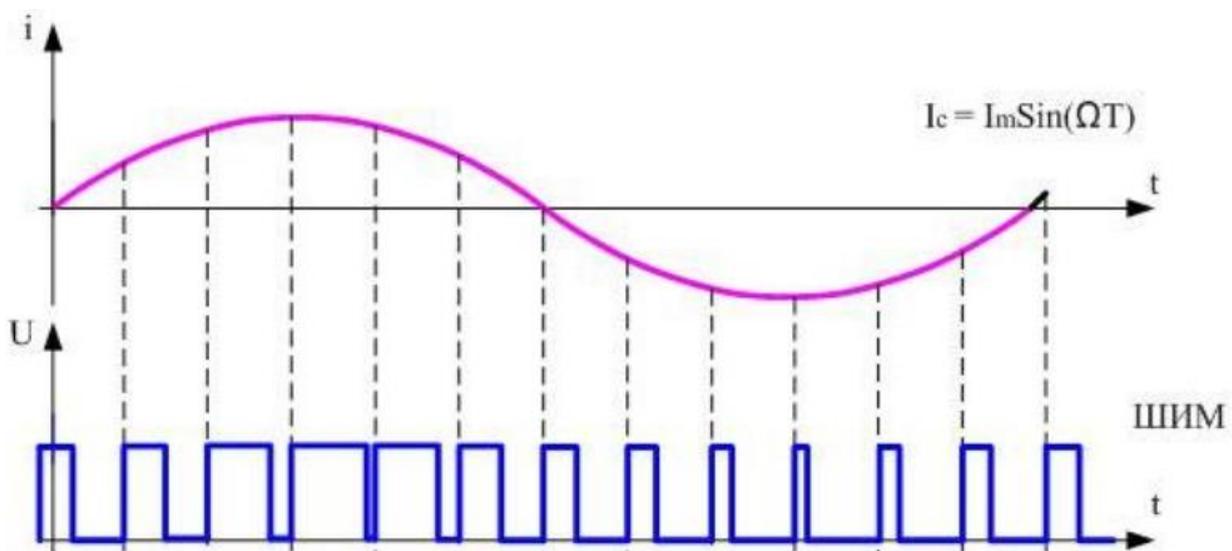


Рис. 3. Временная диаграмма ШИМ



Модуляторы ширины импульсов – это также довольно простые устройства с точки зрения реализации, однако ключевым моментом в передаче ШИМ-сигнала является скорость нарастания и спада восходящего и нисходящего фронтов. Для достижения высоких значений скоростей требуется быстродействующая компонентная база, являющаяся более дорогостоящей, чем в случаях с ЧИМ и АИМ. Демодуляция ШИМ-сигнала реализуется в виде формирователя импульсов-компараторов с последующей фильтрацией. Широтно-импульсная модуляция не так чувствительна к высокочастотным помехам ввиду того, что важны моменты перехода единицы в ноль и наоборот, однако сильные короткие всплески могут привести к ложному срабатыванию формирователя импульсов. Ввиду того, что через изолирующий барьер необходимо передавать фронты сигналов, то размер изоляционных компонентов можно также снизить, как и в случае с ЧИМ, а в случае с трансформатором возможна сосредоточенная намотка [5].

### Заключение

Частотно-импульсная модуляция является самым сложным видом, однако она обладает самыми лучшими массогабаритными показателями, также применение ЧИМ осложнено в условиях плохой помеховой обстановки. Амплитудно-импульсная модуляция является самой простой в реализации, обладает хорошей устойчивостью к помехам, однако обладает самой высокой погрешностью преобразования. Амплитудно-импульсная модуляция также требует высокого качества намотки трансформатора, что может наложить ограничения на напряжение изоляции. Широтно-импульсная модуляция является компромиссным решением между двумя другими видами и при применении современной компонентной базы позволяет достичь погрешности преобразования 0,2 % от полной шкалы, чего достаточно в подавляющем большинстве случаев.

### Список литературы

1. Полушин П. А., Самойлов А. Г., Самойлов С. А. Импульсные виды модуляции : учеб. пособие. Владимир, 2004.
2. Гавриков В. Высоконадежные решения для изоляции цифровых сигналов // Новости электроники. 2015. № 9.
3. Isolated sigma-delta modulator, LVDS Interface // Analog Device. URL: <http://www.analog.com>
4. Каштанов В. В. Анализ фронта выходных импульсов трансформатора // Радиотехника. 1995. Т. 12. С. 38–40.
5. Якушов Д. В., Аверин И. А. Передача цифрового сигнала через развязывающий трансформатор // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2018.

### References

1. Polushin P.A., Samojlov A.G., Samojlov S.A. *Impul'snye vidy moduljacji: ucheb. posobie = Pulse types of modulation : studies. stipend.* Vladimir, 2004. (In Russ.)
2. Gavrikov V. Highly reliable solutions for digital signal isolation. *Novosti jelektroniki = Electronics News.* 2015;(9). (In Russ.)
3. Isolated sigma-delta modulator, LVDS Interface. *Analog Device.* Available at: <http://www.analog.com>
4. Kashtanov V.V. Analysis of the front of the output pulses of the transformer. *Radiotekhnika = Radio engineering.* 1995;12:38–40. (In Russ.)
5. Jakushov D.V., Averin I.A. Digital signal transmission via decoupling transformer. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality.* 2018. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 3.03.2024

Принята к публикации / Accepted 3.04.2024