

PAPER

# СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ КРИВОЙ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Расулова Барчиной Илхомиддин кизи<sup>1,\*</sup> and Хамидов Алиёр Аликул угли<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Навоийский государственный горный и технологический университет, доктарант

<sup>2</sup>Навоийский государственный горный и технологический университет, ассистент

\* rasulova@gmail.com

## Abstract

В статье рассматриваются методы формирования кривой выходного напряжения и регулирования его величины с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Особое внимание уделяется теоретическим основам ШИМ, практическим методам регулирования выходного напряжения, а также влиянию скважности и частоты импульсов на характеристики системы. Описание теории подкреплено формулами, графиками и примерами для улучшения понимания процесса ШИМ.

**Key words:** Широтно-импульсная модуляция (ШИМ), регулирование выходного напряжения, скважность, частота импульсов, преобразователи мощности, источники питания, эффективность преобразования, гармонические искажения, контроль напряжения, модуляция мощности.

## Введение

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) — это техника регулирования электрической мощности, которая широко используется в современных источниках питания, системах управления двигателями, а также в преобразователях частоты. Этот метод основывается на изменении соотношения между временем включения и временем выключения импульсов (скважностью), что позволяет точно контролировать среднее значение выходного напряжения. В отличие от линейных методов регулирования, ШИМ имеет высокую эффективность и минимальные потери энергии, поскольку трансформаторы и другие элементы работают в основном в режиме включения или выключения. [1]

ШИМ используется для формирования выходного сигнала с постоянной частотой, но переменной скважностью. Сиг-

нал ШИМ представляет собой последовательность прямоугольных импульсов, где длительность импульса пропорциональна нужному значению выходного напряжения.

| Преимущества                                  | Недостатки                                             |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Высокая эффективность (низкие потери энергии) | Гармонические искажения (необходимость фильтрации)     |
| Точное регулирование выходного напряжения     | Тепловые потери при высоких частотах                   |
| Простота реализации и контроля                | Повышенная нагрузка на компоненты при высоких частотах |
| Возможность работы с переменной нагрузкой     | Требуются дополнительные элементы для фильтрации       |

ШИМ можно описать как прямоугольный сигнал с постоянной частотой  $f_{\text{ШИМ}}$  и переменной длительностью импульса  $T_{\text{вкл}}$ . Среднее значение выходного напряжения  $V_{\text{сред}}$  зависит от скважности сигнала  $D$ , которая определяется как отношение времени включения импульса к общему периоду сигнала. [5]

$$V_{\text{сред}} = V_{\text{пит}} \cdot D$$

где:  $V_{\text{сред}}$  — среднее напряжение на выходе,

$V_{\text{пит}}$  — напряжение питания,

$D = T_{\text{вкл}} / (T_{\text{вкл}} + T_{\text{выкл}})$  — скважность,

$T_{\text{вкл}}$  — время включения импульса, а  $T_{\text{выкл}}$  — время выключения.

Параметры, которые влияют на работу системы с ШИМ, включают [2,3,4]:

- Частота  $f_{\text{ШИМ}}$  — это количество импульсов в единицу времени. Обычно выбирается такой уровень, при котором заметны только средние значения напряжения, а высокочастотные составляющие не влияют на работу устройства.
- Скважность ( $D$ ) — описывает, какой процент времени сигнал находится в активном состоянии.

Частота ШИМ может быть выбрана в зависимости от приложения: для высокоскоростных устройств она обычно высока (несколько килогерц), а для низкоскоростных — может быть ниже.

## Методы формирования кривой выходного напряжения

Существует несколько методов, основанных на ШИМ, которые позволяют эффективно регулировать выходное напряжение. Они могут включать как изменение скважности, так и изменение частоты.

### • Метод изменения скважности

Этот метод является наиболее простым и эффективным для регулировки среднего выходного напряжения. Скважность  $D$  изменяется в зависимости от нужного уровня выходного напряжения. Например, для работы источников питания с переменной нагрузкой, увеличение скважности приводит к увеличению среднего напряжения на выходе, а уменьшение — к его снижению.

$$V_{\text{выход}}(t) = V_{\text{пит}} \cdot D(t)$$

Скважность можно регулировать с помощью специальных контроллеров или микроконтроллеров, что дает большую гибкость в управлении.

### • Метод изменения частоты

Метод изменения частоты ШИМ используется для улучшения эффективности работы системы при больших нагрузках. С увеличением частоты импульсов можно снизить уровень гармонических искажений и улучшить качество сигнала. Однако на практике увеличение частоты связано с дополнительными затратами на создание высокочастотных компонентов.

$$f_{\text{ШИМ}} = 1 / (T_{\text{вкл}} + T_{\text{выкл}})$$

Изменяя частоту, можно эффективно уменьшать потери на переключение и снизить электромагнитные помехи.

### • Метод комбинированной модуляции

Этот метод включает в себя одновременно регулирование и частоты, и скважности. Такой подход позволяет достигать лучших характеристик по выходному напряжению при более сложных сценариях, таких как работа с высокоэффективными источниками питания и инверторами. [6,7]

ШИМ используется в широком спектре приложений, включая:

- Источники питания для двигателей постоянного тока (DC — преобразователи): ШИМ позволяет эффективно регулировать скорость вращения двигателей, изменяя среднее напряжение.
- Системы освещения на базе светодиодов: Регулировка яркости с помощью изменения скважности позволяет экономить электроэнергию и продлить срок службы светодиодов.
- Преобразователи мощности (инверторы): ШИМ помогает регулировать выходное напряжение и частоту тока для подключения к сети переменного тока. [8,9]

Таблица 1. Зависимость выходного напряжения от параметров

| Скважность (%) | Напр. (V) | Частота (kHz) | Тип нагрузки      | Эффективность (%) |
|----------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|
| 10             | 1.0       | 20            | Линейная нагрузка | 85                |
| 25             | 2.5       | 20            | Двигатель         | 88                |
| 50             | 5.0       | 30            | Освещение         | 90                |
| 75             | 7.5       | 40            | Система отопления | 92                |
| 100            | 10.0      | 50            | Инвертор          | 95                |

Эффективность преобразования энергии в источниках питания с ШИМ оценивается как отношение полезной мощности к общей мощности, потребляемой системой:

$$\eta = \frac{P_{\text{выход}}}{P_{\text{вход}}} \cdot 100\%$$

Для оптимизации эффективности необходимо правильно выбирать параметры частоты и скважности, чтобы минимизировать потери энергии в компонентах цепи. Гармонические искажения возникают из-за высокочастотных составляющих сигнала, особенно при низких значениях скважности. Их можно минимизировать с помощью фильтрации или выбора соответствующих частотных характеристик. [10]

ШИМ широко используется в различных отраслях, включая управление электродвигателями, питание источников питания, аудиотехнику, системы освещения и многое другое.

ШИМ используется в источниках питания, например, в инверторах и преобразователях постоянного тока (DC-DC), для стабилизации выходного напряжения. В таких системах важно, чтобы выходное напряжение оставалось стабильным, несмотря на изменения нагрузки, что достигается с помощью точного регулирования скважности. [3]

ШИМ активно используется для управления электродвигателями, где изменением скважности регулируется подача энергии на мотор, что позволяет точно контролировать его скорость и момент. В таких системах часто используется регулирование с обратной связью, что позволяет автоматически корректировать параметры ШИМ в зависимости от реальных условий работы.

В аудиотехнике ШИМ применяется в усилителях, работающих по классам D и T, для преобразования аудиосигнала в цифровую форму и последующего управления мощностью, подаваемой на динамики. Это позволяет достичь высокой эффективности усилителей, минимизируя потери энергии и тепловые эффекты.

В системах освещения ШИМ используется для регулирования яркости светодиодов. Изменяя скважность, можно управлять средней яркостью, достигая желаемого уровня освещенности.

## Заключение

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) является одним из наиболее эффективных методов для формирования кривой и регулирования выходного напряжения в электрических устройствах. Применение ШИМ позволяет снизить потери энергии, минимизировать гармонические искажения и повысить эффективность работы системы. Использование ШИМ в различных областях, таких как преобразователи мощности, источники питания для двигателей и системы освещения, подтверждает его универсальность и значимость в современной электронике.

## Список литературы

1. Г. В. Баранов, «Широтно-импульсная модуляция и её применения», М.: Наука, 2005.
2. М. В. Корнев, «Системы с широтно-импульсной модуляцией», М.: Энергия, 2008.
3. Л. Я. Бояркин, «Электронные преобразователи на базе ШИМ», М.: Высшая школа, 2010.
4. В. М. Стариков, «Применение ШИМ в источниках питания», Журнал радиоэлектроники, 2012.
5. С. А. Петров, «Методы контроля и регулирования напряжения в цепях постоянного тока», Электротехника, 2011.
6. К. Д. Смирнов, «Теория и практика широтно-импульсной модуляции», Сибирский университет, 2013.
7. A. N. Khalil, «Pulse Width Modulation and its Applications», IEEE Transactions, 2011.
8. D. G. Manjunath, «Modulation Techniques in Power Electronics», Wiley, 2009.
9. G. L. Arce, «PWM Techniques in Electrical Engineering», Springer, 2014.
10. V. J. G. Narasimhan, «Power Conversion with PWM», McGraw-Hill, 2015.