

## ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ЦИФРОВОГО СИГНАЛА

студентка гр. 113801 Бричковская М.С.

*Научный руководитель - канд. техн. наук Ролич О. Ч.*

Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники

Минск, Беларусь

В системах с импульсной модуляцией немодулированная несущая обычно представляет собой серию регулярно повторяющихся импульсов. Частоту повторения импульсов определяют, исходя из допустимой точности восстановления непрерывного сообщения при его демодуляции. Минимальное значение частоты повторения импульсов:

$$f_{0\min} = \frac{1}{t_{0\max}} = 2f_a, \quad (1)$$

где  $f_a$  – максимальная частота в спектре передаваемого непрерывного низкочастотного сообщения,  $t_{0\max}$  – максимальный период следования импульса.

Реальные сигналы, как правило, имеют бесконечный спектр. Поэтому интервал дискретизации, определенный на основании теоремы Котельникова, рассматривают как приближенное значение для

функций с неограниченным спектром[1]. На практике интервал дискретизации уменьшается по сравнению с расчетной в 2-6 раз, а максимальную частоту определяют экспериментально.

Частотно-импульсная модуляция — это процесс, при котором информация о входном сигнале кодируется во временные интервалы идентичных импульсов, излучаемых на выходе модулятора.

Выходной сигнал частотно-импульсного модулятора  $u(t)$  определяется как последовательность  $N$  импульсов равной силы  $M$ , испускаемых в моменты времени  $t_k$ , т. е.

$$u(t) = M \sum_{k=0}^N \delta(t-t_k), \quad 0 < t < t_{N+1}, \quad (2)$$

Время излучения импульса  $t_k$  имеет некоторую функциональную зависимость от входного сигнала  $e(x)$ . Рассмотрим, например, интегрально-импульсную частотную модуляцию (ИЧИМ.), которая определяется таким образом, что входной сигнал подается на интегратор, выход которого  $z(t)$  подается на пороговое устройство, которое, когда  $z(t)$  достигает порогового значения  $S$ , сбрасывает интегратор и испускает импульс силой  $M$ . Таким образом, функциональное соотношение, определяющее  $t_i$ , определяется выражением:

$$z(t) = \int_{t_{i-1}}^t e(x) dx, \quad t_{i-1} < t < t_i, \quad (3)$$

$$t_i = \min \{t | t > t_{i-1}, z(t) \geq S\} \quad (4)$$

При ЧИМ длительность импульсов не изменяется, но модулируется время между ними (изменяются частота и период следования). Период импульсов изменяется по закону:

$$T(t) = T_0 + ke(t), \quad (5)$$

где  $T_0$  – период следования импульсов в отсутствие модуляции,  $e(t)$  – входной сигнал,  $k$  – глубина модуляции.

При программировании ЧИМ устройств обычно устанавливается время цикла устройства  $t_c$  в регистре, а затем использует другой регистр, чтобы указать количество импульсов  $N$ , которые должны быть отправлены устройством в течение цикла. Количество импульсов обычно называют рабочим циклом, и его значение выбирается таким образом, чтобы  $0 \leq N \leq t_c$ . Устройство будет продолжать выводить эту последовательность импульсов до тех пор, пока не будет изменено значение  $N$ .

Каждый импульс передает фиксированное количество энергии устройству. Когда импульсы поступают на устройство, они эффективно фильтруются с помощью фильтра нижних частот, что вызывает задержку или фазовый сдвиг принятого сигнала.

Метод частотно-импульсной модуляции применяется для плавного изменения яркости светодиодов, оборотов двигателей, в работе с динамиками.

Однако при управлении такими устройствами напрямую с помощью цифровых импульсов необходимо следить за тем, чтобы минимальная частота импульсов оставалась выше порога, который может быть обнаружен человеческими органами чувств. Например, при работе с динамиком минимальная частота импульсов должна составлять не менее 40 кГц, чтобы человеческое ухо не различало отдельные импульсы. Точно так же при прямом управлении светодиодом частота должна быть не менее 70 Гц, чтобы глаз не мог обнаружить отдельные импульсы, потому что они будут восприниматься как эффект мерцания. При работе мотора на низких частотах будут слышны посторонние звуки. Решить эту проблему можно путем сглаживания импульсов, добавлением фильтра нижних частот, переносом ЧИМ сигнала в область более высоких частот.

Полоса пропускания спектра ЧИМ определяется диапазоном частот, которые могут быть переданы, а также разрешением, с которым входной сигнал может быть закодирован в частоту импульсов.

Полоса пропускания выражается следующей формулой:

$$B = 2\Delta f, \quad (6)$$

где  $B$  — ширина полосы, а  $\Delta f$  — девиация частоты.

Отклонение частоты сигнала ЧИМ (девиация) представляет собой максимальную величину, на которую частота импульсов может отклоняться от своего среднего значения. Она определяется по следующей формуле:

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}, \quad (7)$$

где  $f_{\max}$  — максимальная частота импульсов, а  $f_{\min}$  — минимальная частота импульсов.

В целом, полоса пропускания сигнала ЧИМ намного уже, чем у аналогового сигнала с тем же разрешением, потому что частота последовательности импульсов может изменяться только дискретными шагами. Тем не менее, ЧИМ имеет преимущество в том, что он более устойчив к шуму, потому что последовательность импульсов представляет собой цифровой сигнал и может быть точно восстановлена, даже если она искажена.

Использование метода ЧИМ позволяет добиться функционала аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей надежным и менее ресурсозатратным способом. Микроконтроллер может получать на вход аналоговые данные и преобразовывать их в цифровую последовательность 0 и 1, идущих с переменной частотой. На выходе устройства цифровой код преобразуется в напряжение. Таким образом формируется непрерывный сигнал, который в дальнейшем может быть сглажен фильтром нижних частот[2].

Устройства с ЧИМ действительно имеют некоторые преимущества для преобразования постоянного тока в постоянный, включая лучшую эффективность преобразования с низким энергопотреблением, меньшую общую стоимость решения и простые топологии преобразователей, но менее популярны, из-за некоторых заметных недостатков.

К таким недостаткам можно отнести то, что схемы фильтрации для преобразователя с фиксированной частотой гораздо проще спроектировать, чем для устройства, работающего в широком диапазоне частот. Во-вторых, значительная пульсация напряжения на выходе может вызвать быстрое разрушение используемого в схемах кремния. В-третьих, работа ЧИМ на низкой частоте увеличивает время переходного отклика коммутационного преобразователя, что может привести к медленному отклику и разочарованию потребителей в работе некоторых портативных устройств.

При работе с микроконтроллером метод ЧИМ позволяет получить на выходе динамика ноты различной частоты путем преобразования модулирования частоты последовательности прямоугольных импульсов по закону аналогового информационного сигнала.

На рисунках 1 и 2 изображены аналоговый сигнал и последовательность импульсов для нот различной частоты соответственно.

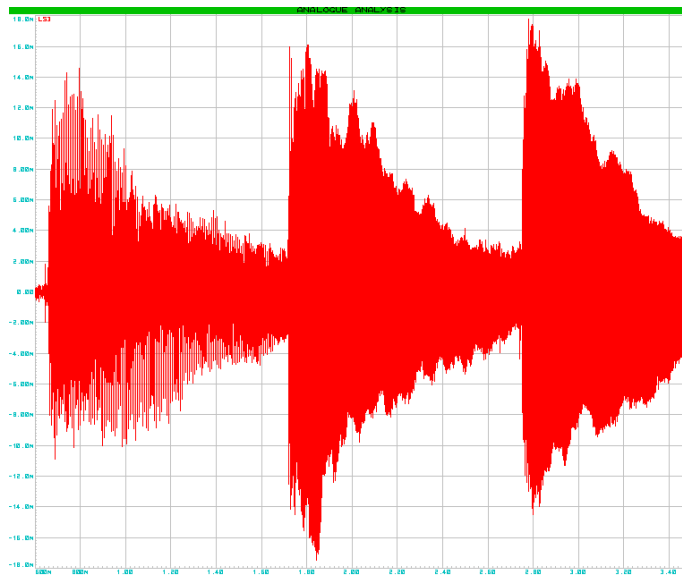


Рисунок 1 – Аналоговый сигнал нот различной частоты

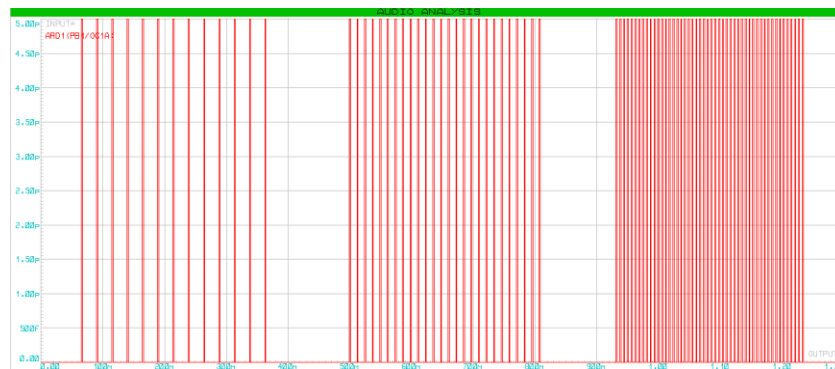


Рисунок 2 – Модулированная последовательность импульсов для нот различной частоты

Для демонстрации применения ЧИМ для работы со светодиодами в среде автоматизированного проектирования Proteus 8 была создана электронная схема, состоящая из микроконтроллера Arduino UNO, трёх светодиодов, резисторов и осциллографа.

Микроконтроллер был запрограммирован таким образом, что на светодиоды подаются прямоугольные импульсы, одинаковые по амплитуде и длительности, но отличающиеся по частоте повторения. Полученные с помощью частотно-импульсной модуляции последовательности импульсов, подаваемые на светодиоды, представлены на рисунке 3.

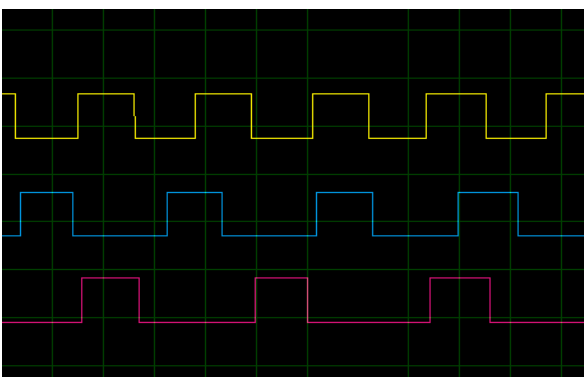


Рисунок 3 – Импульсы, подаваемые на светодиоды

Увеличение периода импульсов при неизменной длительности одного импульса приводит к увеличению скважности.

$$S = \frac{T}{t}, \quad (8)$$

где  $T$  – период импульсов,  $t$  – длительность импульса,  $S$  – скважность.

Из увеличения скважности следует уменьшение рабочего цикла, а значит и уменьшение напряжения, подаваемого на светодиоды.

На рисунке 4 представлена спроектированная схема в момент выполнения программы.

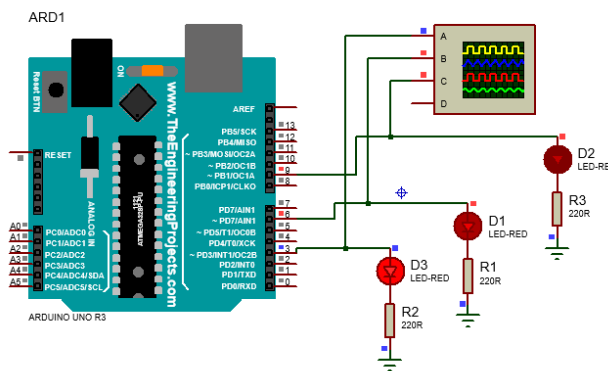


Рисунок 4 – Электронная схема в момент выполнения программы

Как видно из рисунков выше, на светодиод, подключенный к третьему пину микроконтроллера, подается последовательность импульсов с наибольшей частотой. Данная последовательность имеет наименьшую скважность,

наибольший рабочий цикл. Напряжение на светодиоде, а значит и яркость, максимально.

Последовательность импульсов, подаваемая на светодиод, подключенный к девятому пину, имеет наименьшую частоту и наибольшую скважность, чем объясняется наименьшая яркость светодиода.

Чтобы проанализировать спектр сигнала ЧИМ с помощью преобразования Фурье, необходимо применить преобразование Фурье к сигналу, чтобы разложить его на составляющие частоты и амплитуды.

Получив частотный спектр сигнала ЧИМ, можно проанализировать частоты и амплитуды составляющих частот, чтобы понять ширину полосы и разрешение сигнала. Для этого можно построить спектр и найти самые высокие и самые низкие частоты, присутствующие в сигнале, что даст ширину полосы сигнала[3,4]. На рисунке 5 изображен частотный спектр сигнала ЧИМ, используемый в программе.

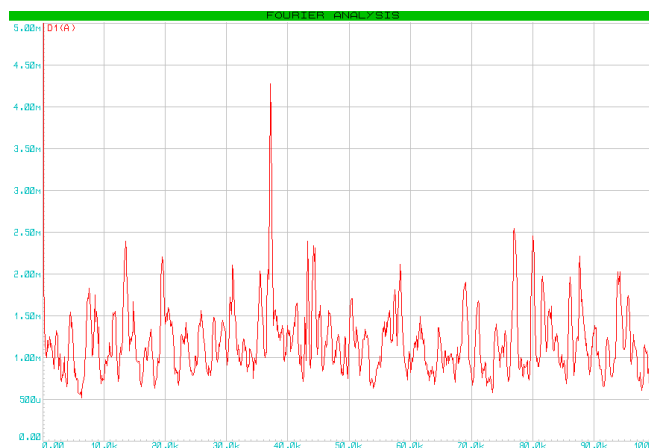


Рисунок 5 – Частотный спектр сигнала ЧИМ

Таким образом, метод ЧИМ позволяет обеспечить плавную регулировку яркости светодиодов, скорости двигателей, отличается высокой помехоустойчивостью и относительно небольшой стоимостью производства устройств на его основе. ЧИМ является полезным методом для передачи цифровых сигналов на большие расстояния или по зашумленным каналам, он широко используется во многих устройствах благодаря своей простоте и надежности. Однако важно учитывать ограничения ЧИМ при принятии решения о том, является ли такой вид модуляции хорошим вариантом для конкретного устройства.

## *Литература*

1. Овсянников В.А. Методы формирования и цифровой обработки сигналов: учеб.-метод. пособие. В 2 ч. Ч. 2: Дискретное преобразование Фурье, фильтрация и модуляция / В. А. Овсянников. – Минск: БГУИР, 2010. – 136 с.
2. Основы цифровой обработки сигналов: Теорема Котельникова, АЦП и ЦАП [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://hub.exponenta.ru/post/osnovy-tsos-teorema-kotelnikova-atsp-i-tsap484> – Дата доступа: 25.12.2022.
3. Бойко Б.П., Тюрин В.А. Спектр сигнала: учебно-методическое пособие / Б.П. Бойко, В.А. Тюрин.- Казань: Казанский федеральный университет, 2014.-38 с. – Режим доступа: [https://kpfu.ru/staff\\_files/F1700343876/SPEKTRY\\_02.01.15.pdf](https://kpfu.ru/staff_files/F1700343876/SPEKTRY_02.01.15.pdf).
4. Медведев С. Ю., Перов М. Ю., Якимов А. В. Влияние быстрого преобразования Фурье на оценку спектра сигнала [Электронный ресурс] / – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/313875219\\_VLIANIE\\_BYSTROGO\\_PRE\\_OBRAZOVANIA\\_FURE\\_NA\\_OCENKU\\_SPEKTRA\\_SIGNALA](https://www.researchgate.net/publication/313875219_VLIANIE_BYSTROGO_PRE_OBRAZOVANIA_FURE_NA_OCENKU_SPEKTRA_SIGNALA) – Дата доступа: 26.12.2022.