



Т.В. Долгова, А.У. Алпаров

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ШИМ

(Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н.Туполева-КАИ)

В системах автоматического управления для того чтобы получить достаточно мощный сигнал постоянного тока для управления двигателями постоянного тока, нужно иметь усилитель постоянного тока. Однако усилитель постоянного тока имеет низкий КПД, большие габариты и низкую надежность. Появилась возможность использовать широтно-импульсное модулирование, которое позволяет построить усилитель постоянного тока для потребителей с ограниченной полосой пропускания любой мощности, малых габаритов и при этом обеспечивая максимально возможный КПД системы модулятор+потребитель. В данной работе было предложено реализовать алгоритм формирования ШИМ сигнала сочетающий точность и аппаратную реализуемость двухполярного реверсивного сигнала при малых  $K_k$  и преимущества однополярного реверсивного сигнала при больших сигналах. Формируя сигнала по такому алгоритму мы сохранили высокий КПД системы однополярной реверсивной модуляции при  $K_k > \beta$  и высокую точность и воспроизводимость нуля не хуже чем в двухполярной реверсивной модуляции при  $K_k < \beta$ .

При больших  $K_k \geq \beta$ , где  $\beta$  зависит от характера нагрузки и аппаратных возможностей, сигнал ШИМ формируется как сигнал однополярной реверсивной модуляции, импульсы однополярные, переменной длительности при постоянном периоде  $T = T_n + T_p$ . При  $K_k < \beta$  сигнал ШИМ двухполярный, но отличается от двухполярной реверсивной модуляции тем, что импульсы одной полярности, совпадающей по знаку с  $K_k$ , имеют постоянную длительность равную  $(T_n + T_p)\beta = T\beta$ , а импульсы другой полярности имеют длительность определяемую из соотношения  $K_k = \frac{T_+ - T_-}{T}$ , где  $T = T_+ + T_- = T_n + T_p$  [1].

При формировании сигнала по такому алгоритму при  $K_k > \beta$  сохраняется высокий КПД системы однополярной реверсивной модуляции, а при  $K_k < \beta$  сохраняется высокая точность и воспроизводимость нуля не хуже чем в двухполярной реверсивной модуляции (рис. 1). Стоит отметить, что для САУ очень важна работа вблизи нуля. Использование данного алгоритма позволяет решить данную проблему, а именно исключить зону нечувствительности. Оценить величину коммутационных потерь, определяющих КПД системы без учета потерь на ключах моста, при  $K_k = 0$  можно как те же потери что и в двухполярной реверсивной модуляции, но уменьшенные в  $\frac{1}{\beta^2}$  раза. Потери при  $\beta > K_k > -\beta$  изменяются от максимума, определенного при  $K_k = 0$ , до минимума на краях этого диапазона. Тепловые потери в ключах, в зависимости от физической при-



роды применяемых в ключах элементов, определяются падением напряжения на них в открытом состоянии и потерями в процессе переключения. Необходимо учесть, что КПД использования ШИМ сигнала определяется мощностью  $P$  гармоник этого сигнала, где  $P = U_d * I_d$ . Ток гармоник определяется электрической АЧХ потребителя и потерями на вихревые токи и перемагничивание в его магнитопроводе. Данные потери измеряются в Вт/кг, и рассчитать их нет возможности, так как расчёт нужно выполнять для конкретного случая, но эти потери малы, поэтому их не учитываем [2].

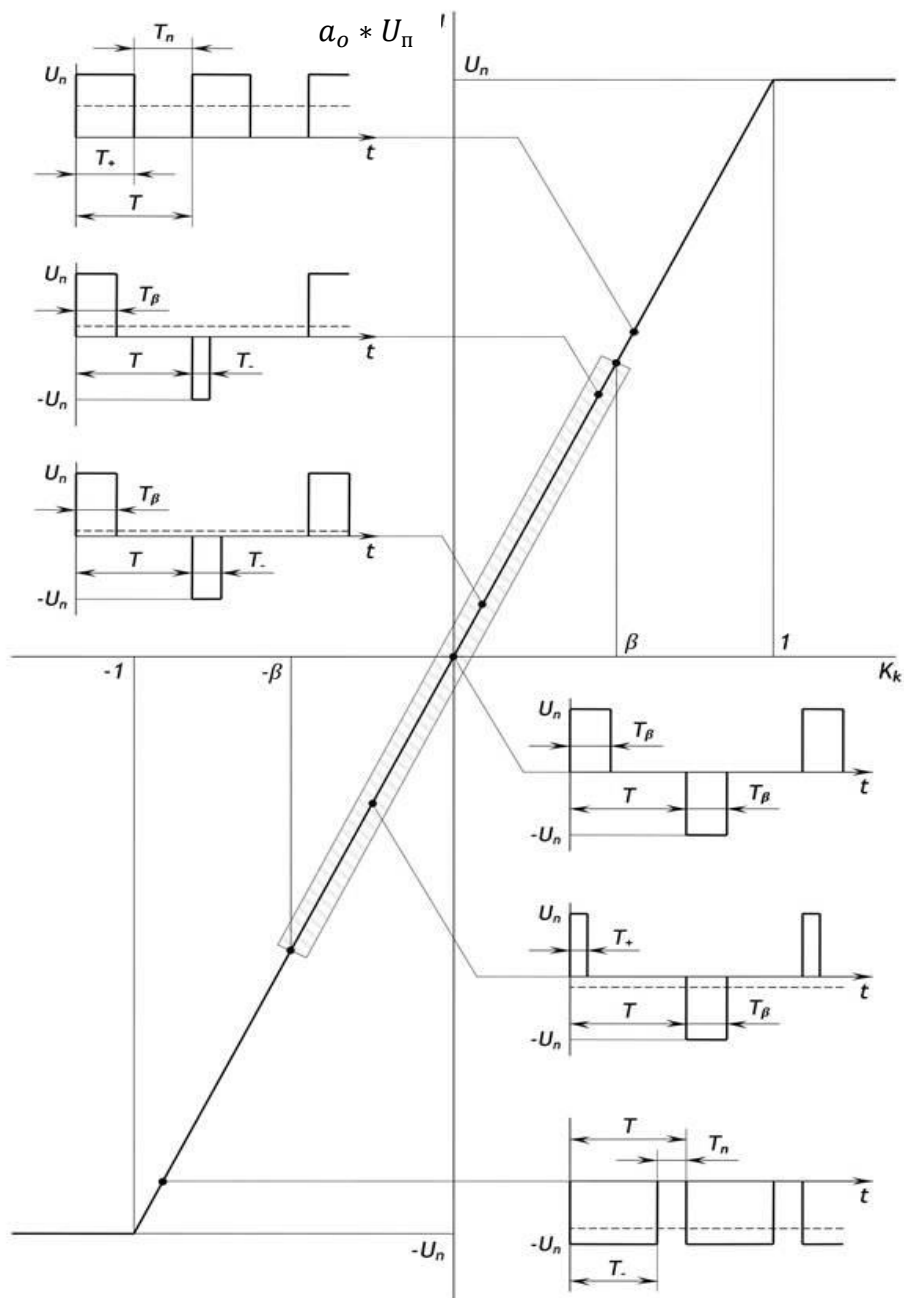


Рис.1 Алгоритм формирования модифицированного ШИМ сигнала



Для определения КПД системы важно знать гармонические составляющие выходного сигнала модулятора. Гармоники сигнала определяют величину потерь на потребителе и соотношение между мощностью постоянной составляющей и мощностью гармоник определяющих КПД системы модулятор+потребитель. Необходимо определить гармонические составляющие тока и напряжения для определения КПД системы.

Был проведен анализ гармонических сигналов однополярной, двухполярной и модифицированной ШИМ путем разложения в ряд Фурье [3].

Для модифицированной ШИМ разложение в ряд Фурье имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{T} \left( T_{\beta} - \left( \frac{T}{2} + \Delta \right) + \left( \frac{T}{2} - \Delta \right) \right) +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{\pi k} \left( \sin \frac{2\pi k T_{\beta}}{T} - \sin \frac{2\pi k \left( \frac{T}{2} + \Delta \right)}{T} + \sin \frac{2\pi k \left( \frac{T}{2} - \Delta \right)}{T} \right) \cos \left( k \frac{2\pi}{T} t \right) + \right. \quad (1)$$

$$\left. + \frac{1}{\pi k} \left( -\cos \frac{2\pi k T_{\beta}}{T} + 1 + \cos \frac{2\pi k \left( \frac{T}{2} + \Delta \right)}{T} - \cos \frac{2\pi k \left( \frac{T}{2} - \Delta \right)}{T} \right) \sin \left( k \frac{2\pi}{T} t \right) \right)$$

С использованием прикладного пакета программ MATLAB и в соответствии с разработанным алгоритмом были вычислены коэффициенты тригонометрического ряда, амплитуды, действующие значения тока, напряжения и мощности переменной составляющей сигнала.

По полученным данным для каждого вида ШИМ был составлен график зависимости мощности потерь от коэффициента команды (рис.2).

По данному графику видно, что в области около единицы все три сигнала имеют примерно один уровень потерь по  $K_k$ . Максимальные потери мощности у двухполярной ШИМ, они превышают потери однополярной ШИМ в четыре раза. При  $K_k$  около нуля потери однополярной ШИМ минимальны, потери двухполярной ШИМ максимальны, а потери модифицированной ШИМ в 2,5 раза меньше, чем у двухполярной. Заштрихованная область наглядно показывает этот выигрыш модифицированной ШИМ у двухполярной. Если сравнивать с однополярной, то видим, что потери модифицированной ШИМ больше, но модифицированная ШИМ имеет ряд преимуществ, она избавлена от тех недостатков, которые имеют однополярная и двухполярная модуляции. Стоит отметить, что модифицированная ШИМ сначала формируется как сигнал однополярной реверсивной модуляции, а при  $K_k < \beta$  переходит в режим двухполярной модуляции, но отличается от двухполярной ШИМ тем, что импульсы одной полярности имеют постоянную длительность, а импульсы другой полярности переменную длительность. При формировании сигнала по такому алгоритму при



$K_k > \beta$  сохраняется высокий КПД системы однополярной реверсивной модуляции, а при  $K_k < \beta$  сохраняется высокая точность и воспроизводимость нуля не хуже чем в двухполярной реверсивной модуляции. Еще раз отметим, что для САУ очень важна работа вблизи нуля, а формируя сигнал по такому алгоритму мы избавляемся от проблемы зоны нечувствительности.

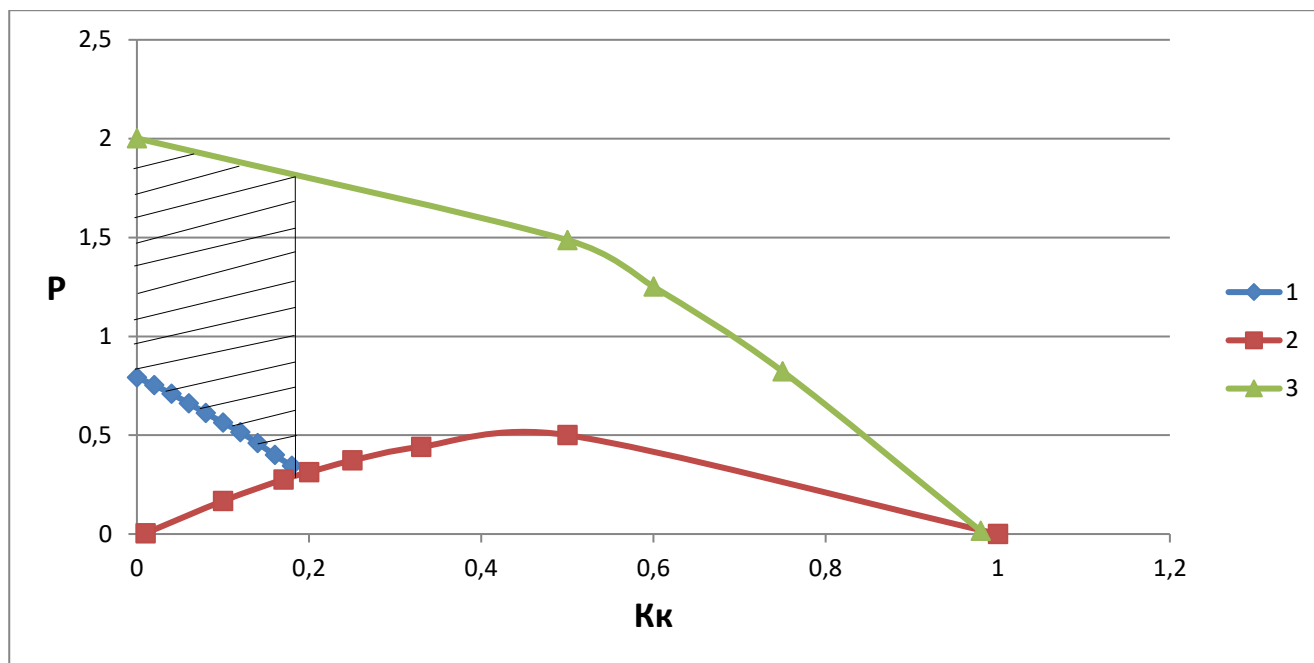


Рис. 2. Зависимость мощности потерь от коэффициента команды для сигнала модифицированной ШИМ(1), для сигнала однополярной ШИМ(2), для сигнала двухполярной ШИМ(3)

### Литература

[1] Алпаров А. У., Благоев А. Е.. Научная статья «Модифицированная реверсивная широтно-импульсная модуляция». Журнал: Технические науки – от теории к практике. Издательство: Ассоциация научных сотрудников "Сибирская академическая книга" (Новосибирск). 2016. – С. 42-54.

[2] Д. И. Агейкин, М. А. Балашов, С. П. Колосов, В. И. Нефедова, Е. М. Решетников, Н. И. Соколов, В. М. Стромиллов, Н. М. Тищенко, Н. П. Удалов. Руководство по проектированию элементов и систем автоматики. Оборонгиз, 1959.

[3] Справочник по радиоэлектронике. Том 1. Под общей редакцией А. А. Куликовского. Издательство «Энергия». Москва. 1967.