И. А. Баховцев

1.5.1. Аппаратные способы реализации ШИМ

Компараторный

(спец. ШИМ-модуль)

- Текущее состояние двоичного счетчика (аналог ГОН) сравнивается в цифровом компараторе с кодом модулирующего сигнала, хранящимся в регистре сравнения (аналог ГМН). На выходе компаратора формируются сигналы ШИМ.
- Автоматическая реализация сервисных функций управления АИН.

Таймерный

(МК общего назначения)

- В регистр периода таймера заносится цифровой код длительности, двоичный счетчик запускается в режиме вычитания. По обнулению счетчика таймер формирует запрос на прерывание для формирования сигналов ШИМ.
- Сервисные функции управления АИН реализуются другими периферийными устройствами или внешними схемами.

1.5.2. Синусоидальная ШИМ, биполярный опорный сигнал

Задача: *вывести выражение для ц*
синусоидального модулирующего
модуляции) *при изменении его*
заданной ступенчатой аппроксимации

Расчет кода модуляции – это вопрос развертывания модулирующего сигнала по амплитуде.

(*K* - относительное дискретное время)

Исходные положения:

1. Уравнение фазовой модуляции - $e_{\text{м}}(t) = e_{\text{оп}}(t)$, его решение - положение фронтов прямоугольных импульсов на периоде $T_{\text{оп.}}$
2. Модулирующий и опорный сигналы – идеальные биполярные сигналы.
3. В линейном диапазоне регулировочной характеристики изменение модулирующего сигнала по амплитуде происходит в области существования опорного сигнала.

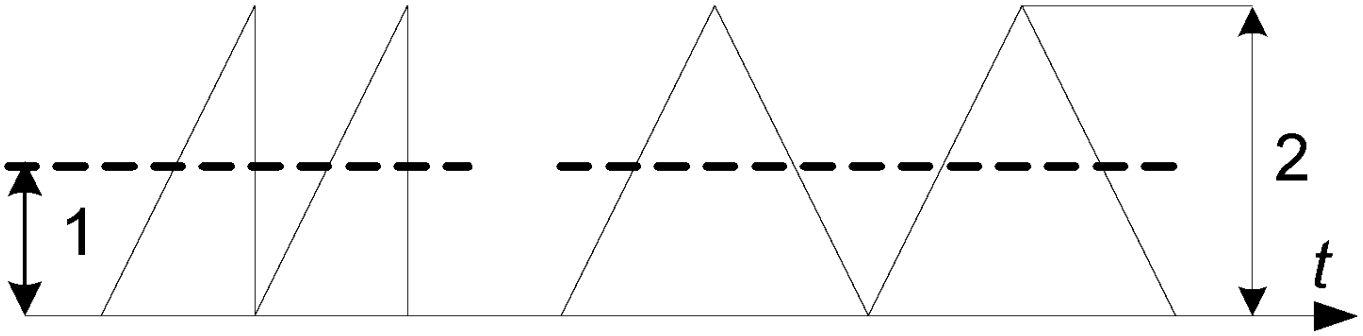
Замечание. Если уравнение $F_1(x) = F_2(x)$ имеет решение $x=Q$, то уравнение $F_1(x) + C = F_2(x) + C$ (где C – константа) имеет то же самое решение.

Пусть $E_{оп}=1$, тогда $E_м=M$.

Выражение для модулирующего сигнала:

$$M_{[К]}=MS_{[К]}$$

Цифровой аналог ГОН – двоичный счетчик, цифровой выход которого – положительное число.



Это - первая смещенная функция $F_1(x) + C$

$$M'_{[K]}=1+MS_{[K]}$$

Это вторая смещенная функция: $F_2(x)+C$

- При единичной глубине модуляции и изменении ступенчатой синусоидальной функции $S_{[K]}$ в диапазоне от −1 до +1 величина $M'_{[K]}$ будет меняться в диапазоне от 0 до 2.

Синусоидальная ШИМ, биполярный опорный сигнал

Состояние двоичного счетчика меняется от нуля до некоторой программируемой величины, которая называется кодом периода ($N_{\max}$).

При цифровой реализации ШИМ эта величина равна размаху опорного сигнала, т.е. двум. Тогда в системе координат двоичного счетчика $1 \equiv N_{\max}/2$. Умножим на «единицу» вторую смещенную функцию и окончательно получим:

$$N_{m[K]} = \frac{N_{\max}}{2}\left(1 + MS_{[K]}\right)$$

Код периода опорного сигнала определяется из выражения:

$$T_{\text{оп}} = N_{\max} T_{\text{т}} K_{\text{тш}}$$

где $T_{\text{т}}$ – период импульсов, тактирующих двоичный счетчик;

$K_{\text{тш}}$ – коэффициент, зависящий от типа ШИМ.

Для ОШИМ $K_{\text{тш}}$ =1.

Для ДШИМ $K_{\text{тш}}$ =2.

Пример расчета кода модуляции.

Дано:

- $N_{ст}$ = 12, т.е. $K = 0,(N_{ст} - 1) = 0,11$
- N_{max} = 255
- модулирующий сигнал трехфазный

K	$S_{[K]}$	$N_{m[k]}$ для фазы *A*		для фазы *B*	для фазы *C*
		10-й код	16-й код	16-й код	16-й код
0	**0,259**	161	*A*1	04	*DA*
1	**0,707**	218	*DA*	04	*A*1
2	**0,966**	252	*FC*	25	5F
3	0,966	**252**	***FC***	5F	25
4	0,707	**218**	***DA***	*A*1	04
5	0,259	**161**	***A1***	*DA*	04
6	-0,259	**95**	**5F**	*FC*	25
7	-0,707	**37**	**25**	*FC*	5F
8	-0,966	**04**	**04**	*DA*	*A*1
9	-0,966	04	04	*A*1	*DA*
10	-0,707	37	25	5F	*FC*
11	-0,259	95	5F	25	*FC*

$$N_{m[K]} = \frac{N_{\max}}{2}\left(1 + MS_{[K]}\right)$$

Пример расчета кода модуляции.

Математически сдвиг фазы *B* относительно фазы *A* выражается $\boldsymbol{\phi_B} = -120^0$.

$$\varphi_{\text{B}} = -120^{\text{o}} = -120^{\text{o}} + 360^{\text{o}} = 240^{\text{o}}$$

Замечание. Угол сдвига между фазами модулирующего сигнала очень важен, особенно при управлении двигателем. При неправильной фазировке последний будет вращаться в противоположную сторону со всеми вытекающими последствиями.

Работа с таблицами кода модуляции.

Процедура извлечения данных из таблиц может быть выполнена двумя основными способами:

- **«один счетчик – три таблицы»**
- **«три счетчика – одна таблица»**

(Здесь «счетчик» – это счетчик номеров ступенек, который со временем должен инкрементироваться)

<u>Способы извлечения основаны на следующем</u>:

1) Число ступенек в фазах модулирующего сигнала одинаково и кратно трем, следовательно, взаимное расположение ступенек всех трех фаз по времени будет совпадать.

2) Фазы модулирующего сигнала с точностью до угла сдвига подобны друг другу.

«Один счетчик – три таблицы».

K	$S_{[K]}$	$N_{m[k]}$ для фазы A		для фазы B	для фазы C
		10-й код	16-й код	16-й код	16-й код
0	**0,259**	161	*A*1	04	*DA*
1	0,707	218	*DA*	04	*A*1
2	0,966	252	*FC*	25	5F
3	0,966	252	*FC*	5F	25
4	0,707	218	*DA*	*A*1	04
5	0,259	161	*A*1	*DA*	04
6	-0,259	**95**	**5F**	*FC*	25
7	-0,707	**37**	**25**	*FC*	5F
8	-0,966	**04**	**04**	*DA*	*A*1
9	-0,966	04	04	*A*1	*DA*
10	-0,707	37	25	5F	*FC*
11	-0,259	95	5F	25	*FC*

При такой организации извлечения данных из таблицы выигрываем в работе со счетчиками номеров ступеней (т.е. в быстродействии), но проигрываем в объеме памяти, отводимой под таблицы.

"Три счетчика – одна таблица".

Используем симметрию МС по фазам

Достоинства и недостатки противоположны предыдущему варианту.

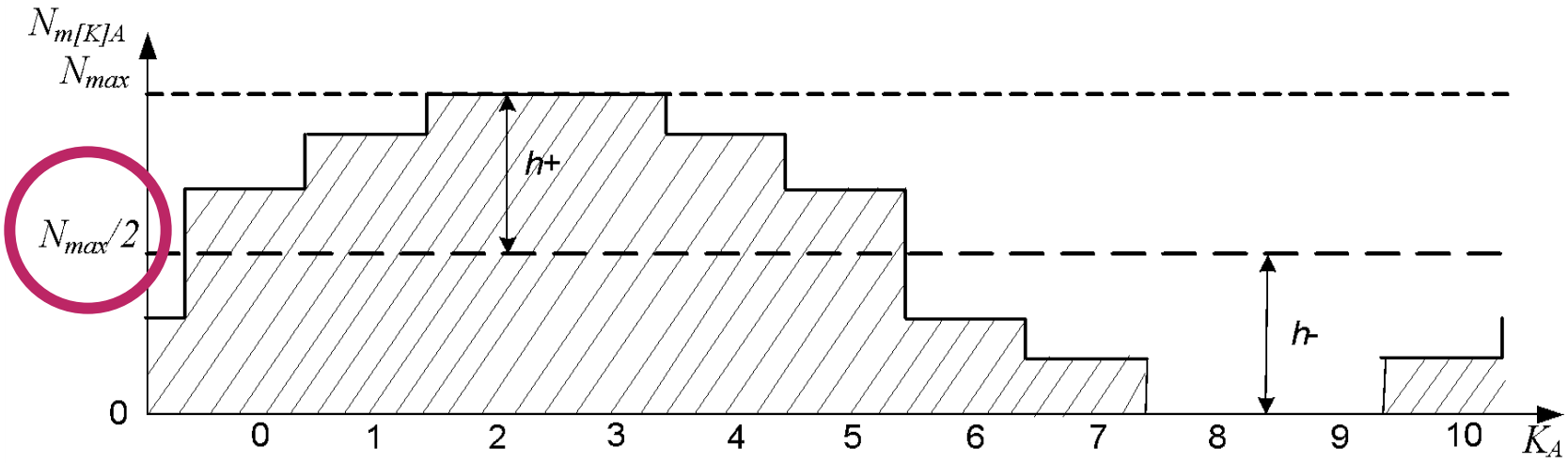
K_A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
K_B	8	9	10	11	0	1	2	3	4	5	6	7
K_C	4	5	6	7	8	9	10	11	0	1	2	3

Способ актуален только при большом количестве ступенек на периоде модулирующего сигнала (100 и более)

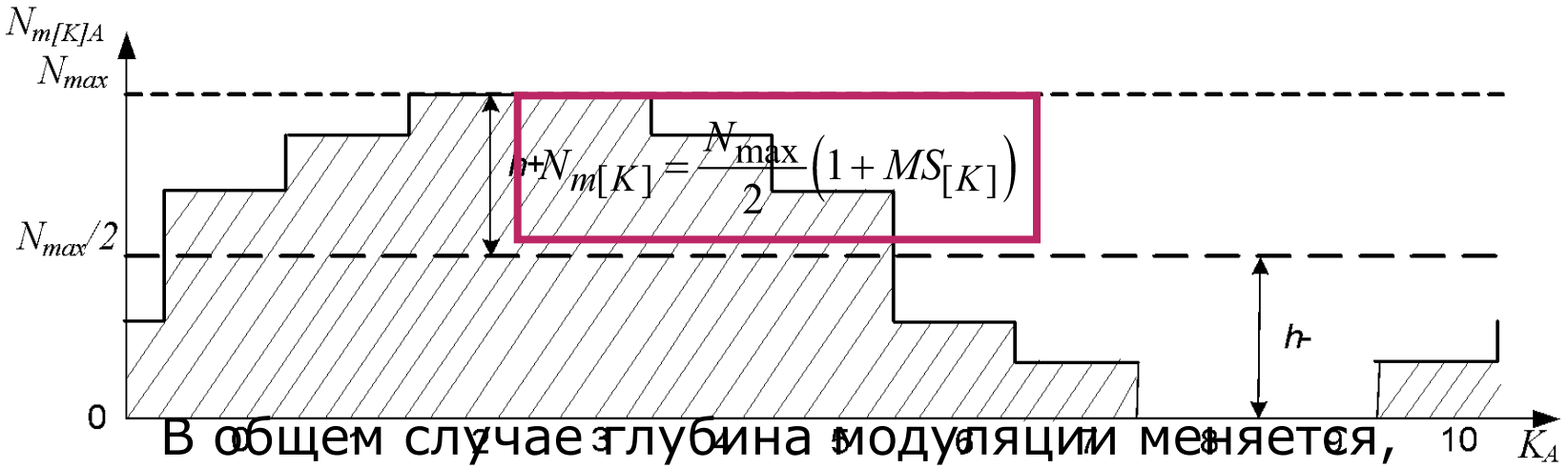
Запомним! *Любое уменьшение массивов при использовании соответствующей симметрии приводит к усложнению соответствующей программы и наоборот*.

Графическое представление $N_{m[K]A}$ в формате счетчика опорного сигнала

$(N_{ст}=12, M=1)$



Как решить проблему беззнакового умножения?



В общем случае глубина модуляции меняется, => надо вычислять произведение $MS_{[K]}$.

$$|h_+| = |h_-|$$

$$N'_{m[K]} = \frac{N_{\max}}{2} M \left|S_{[K]}\right|$$

$$N_{m[K]} = \frac{N_{\max}}{2} \pm MN'_{m[K]}$$

Алгоритм расчета кода модуляции

для варианта «три счетчика – одна таблица»:

1. Выбрать текущее значение кода глубины A, проверить и состояние счетчиков ступеней K_A, K_B, K_C.
2. Для K_A – 6 вычислить для остальных фаз.
3. Умножить код глубины модуляции на табличное значение.
4. Определить полярность текущей ступеньки фазы A.
5. Вычислить и сохранить значение кода модуляции для фазы A:

   если $$0 \le K_A \le \frac{N_{\text{ст}}}{2} - 1,$$

   то $$N_{m[K]} = \frac{N_{\max}}{2} \pm M N'_{m[K]}$$ используется со знаком «+», иначе со знаком «–».

6. Выбрать текущее значение кода глубины A, проверить и состояние счетчиков ступеней K_A, K_B, K_C.
7. Для K_A – 6 вычислить для остальных фаз.

Замечание. При инициализации этой процедуры исходное состояние счетчиков ступеней должно быть установлено следующим: $K_A=0$, $K_B=2N_{\text{ст}}/3$, $K_C=N_{\text{ст}}/3$

Алгоритм расчета кода модуляции

для варианта «один счетчик – три таблицы»:

В этом случае условие $0 \le K_A \le \frac{N_{\text{СТ}}}{2} - 1$ справедливо только для фазы *A*. Для фаз *B* и *C* условия определения полярности выглядят иначе.

Фаза B:
если $\frac{N_{CT}}{3} \le K_B \le \frac{5N_{\text{СТ}}}{6}$, то «+», иначе «–».

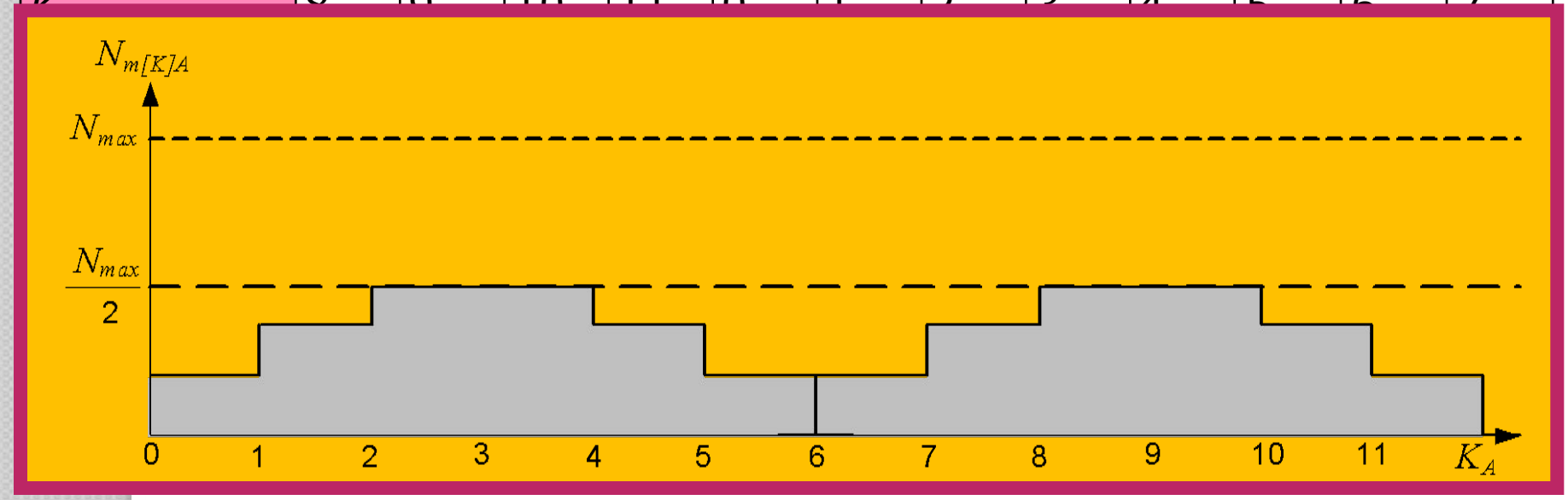
Фаза C:
если $\frac{N_{\text{СТ}}}{6} \le K_C \le \frac{2N_{\text{СТ}}}{3}$, то «–», иначе «+».

$N_{CT}=12,\ M=1.$

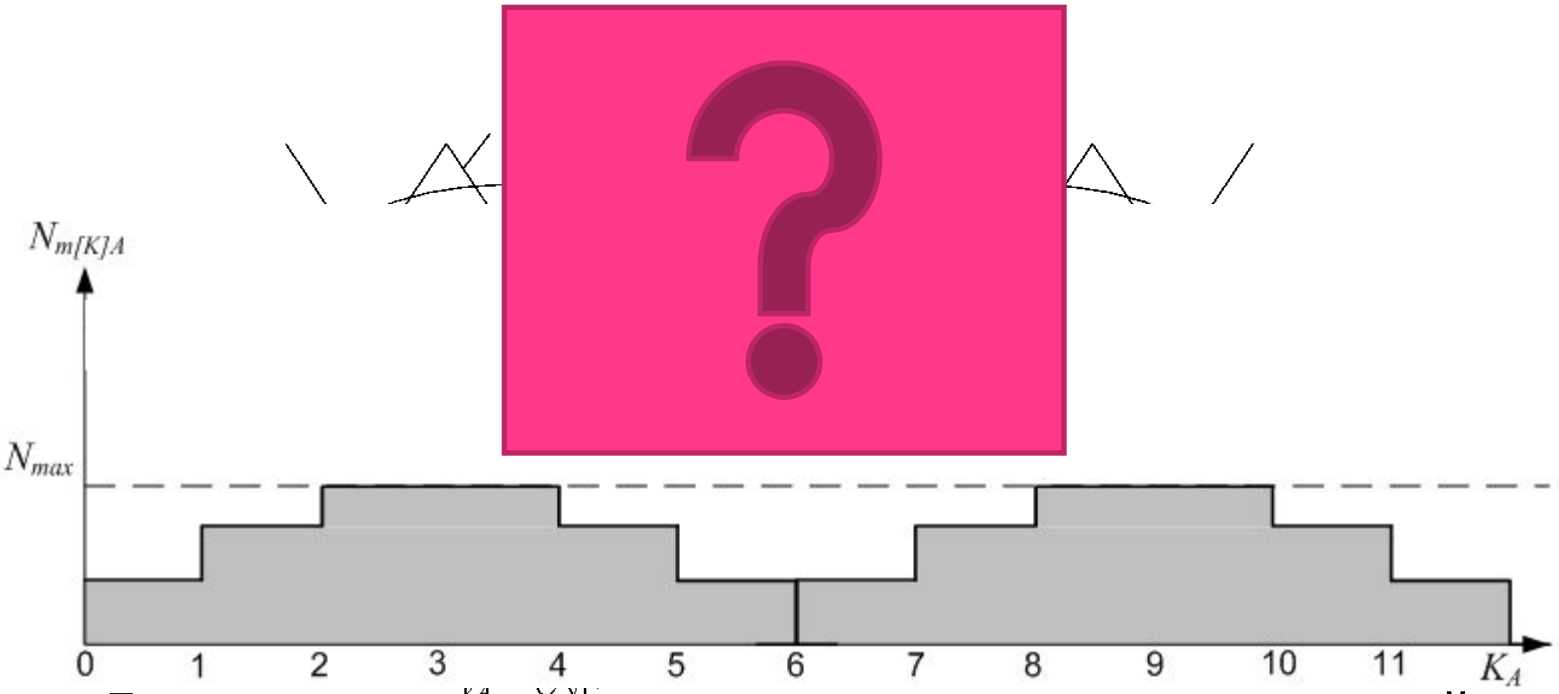
ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ разных вариантов РАСЧЕТА КОДА МОДУЛЯЦИИ

F_POL_A, *F_POL_B*, *F_POL_C* – таблицы флагов полярностей фаз модулирующего сигнала (в них состоянию 0/1 соответствует положительная/отрицательная полуволна), *F_POL_ABC* - обобщенная таблица флагов полярностей этих фаз.

N	$31	$5A	$7C	$7C	$5A	$31	$31	$5A	$7C	$7C	$5A	$31
K_A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F_POL_A	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
K	8	9	10	11	0	1	2	3	4	5	6	7



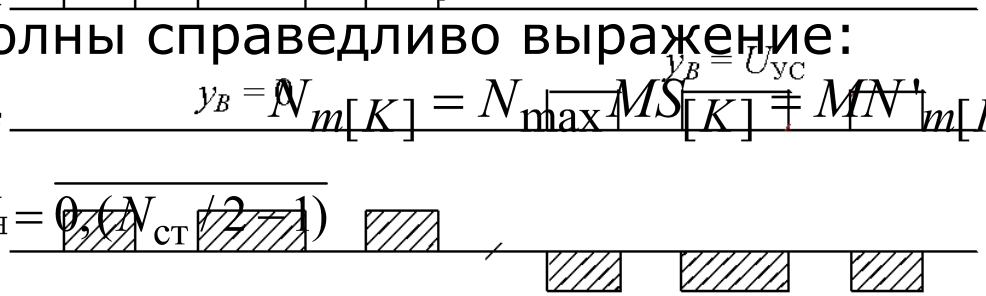
1.5.3. Синусоидальная ШИМ, однополярный опорный сигнал



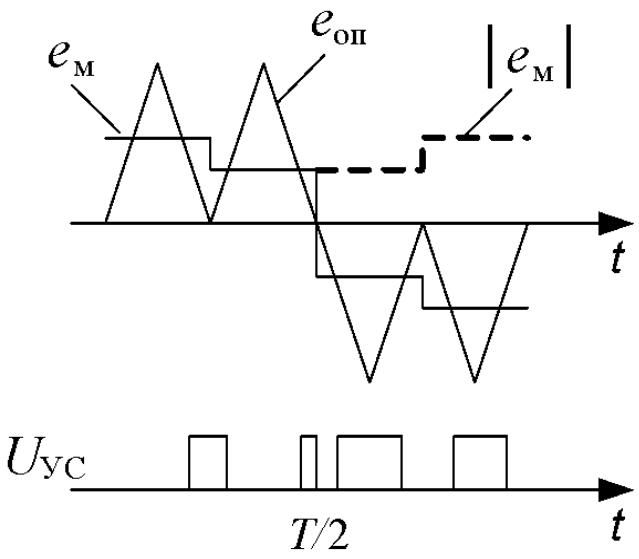
Для расчета кода модуляции для положительной полуволны справедливо выражение:

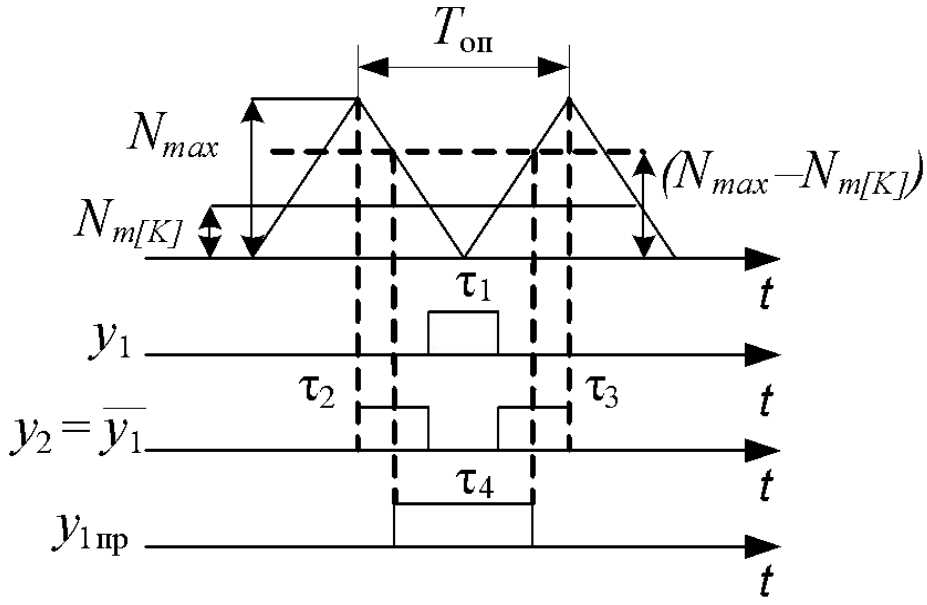
$$N_{m[K]} = N_{\max} - MS_{[K]} + MN'_{m[K]}$$

где $K_H = 0,(N_{ст}/2-1)$



Расчет кода модуляции для отрицательной полуволны





$$\tau_{оп}+\tau_2+\tau_3=T \qquad \tau_{оп}+\tau_3=T-\tau_1$$

$$T_{оп} \equiv N_{max}, \qquad \tau_1 \equiv N_{m[K]}$$

инверсия первого интервала: $\tau_2+\tau_3 \equiv N_{max}-N_{m[K]}$

Программная инверсия – на периоде $T_{оп}$ получаем не два импульса, а один. $\tau_4 = \tau_2 + \tau_3$, значит $y_{1пр}$ и y_2 равны по длительности на периоде опорного сигнала.

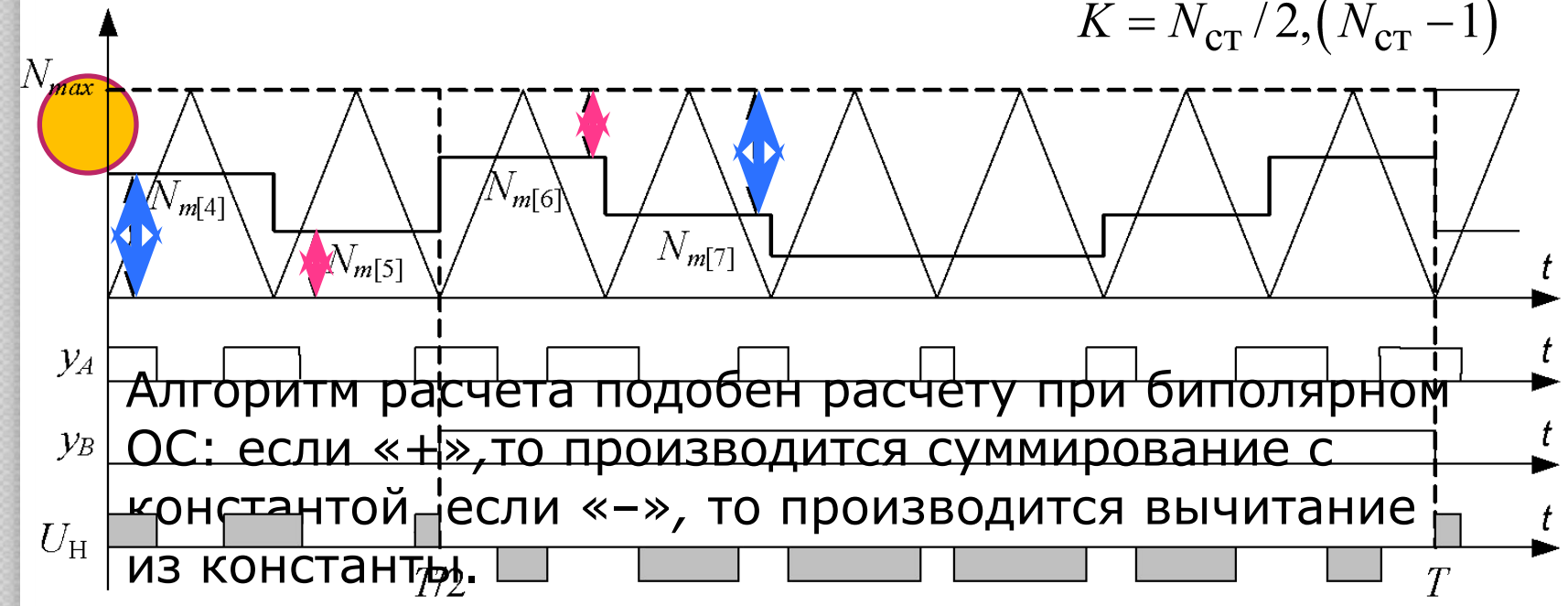
Так как площади импульсов не изменились, то не изменится первая гармоника и не появится постоянная составляющая

Расчет кода модуляции для отрица-тельной полуволны

Код модуляции для отрицательной полуволны при однополярном опорном сигнале:

$$N_{m[K]} = N_{\max} - MN'_{m[K]}$$

$$K = \overline{N_{ст}/2, \left(N_{ст} - 1\right)}$$

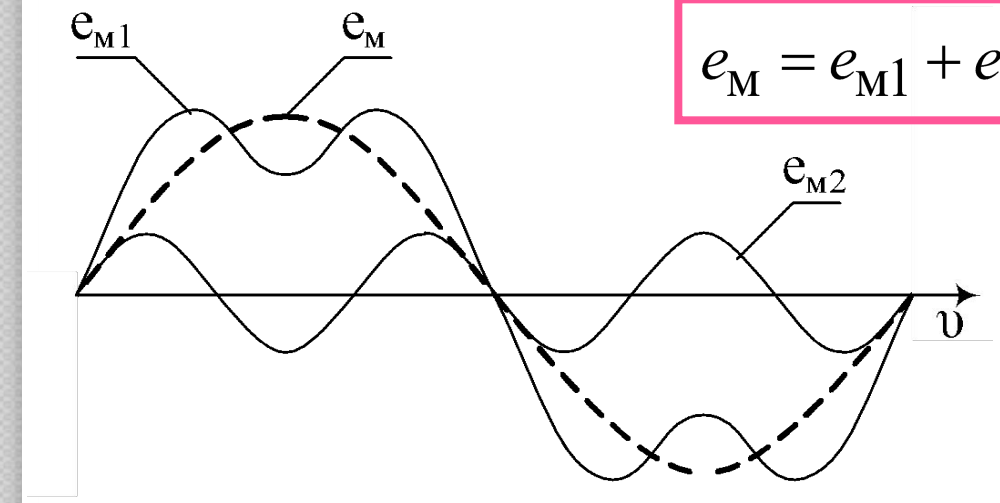


Алгоритм расчета подобен расчету при биполярном ОС: если «+», то производится суммирование с константой, если «–», то производится вычитание из константы.

При биполярном опорном сигнале эта константа равна $N_{max}/2$, а при однополярном ОС это: при «+» нуль, а при «–» это N_{max}.

1.5.4. Расчет кода модуляции для способов ШИМ со сложной формой модулирующего сигнала

Синусоидальная ШИМ с добавлением третьей гармоники.



• для модулирующего сигнала:

$$e_{\text{М}} = e_{\text{М1}} + e_{\text{М2}} = M\left(\sin\Omega t + L\sin 3\Omega t\right)$$

где коэффициент

$$L = 1/6 = 0{,}167$$

Необходимо увеличить $N_{\text{СТ}}$ минимум в 2-3 раза

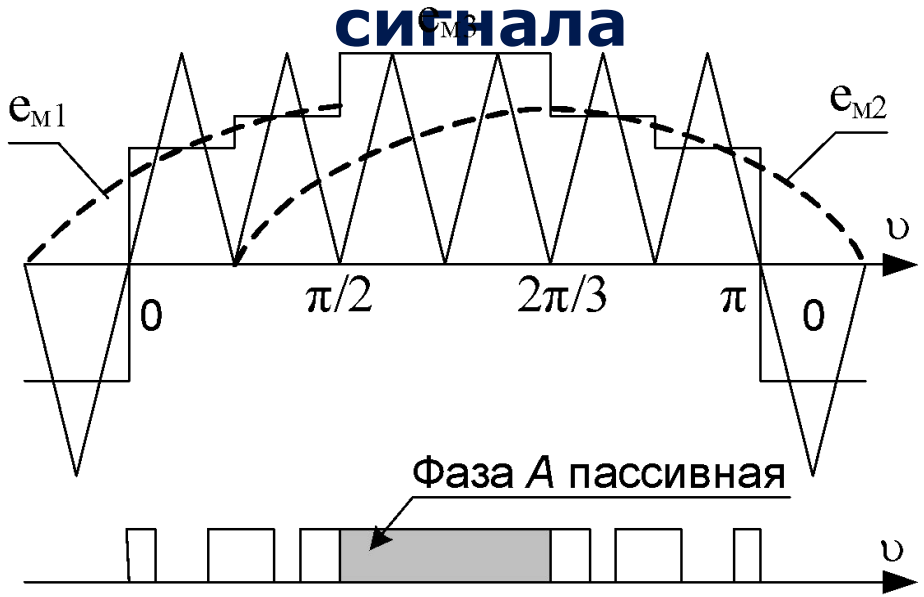
• при ступенчатой аппроксимации:

где $K = \overline{0,(N_{\text{СТ}} - 1)}$

$$S_{[K]} = \sin\frac{\pi}{N_{\text{СТ}}}(2K+1) + L\sin\frac{3\pi}{N_{\text{СТ}}}(2K+1)$$

Расчет кода модуляции для способов ШИМ со сложной формой модулирующего сигнала

Циклическая ШИМ

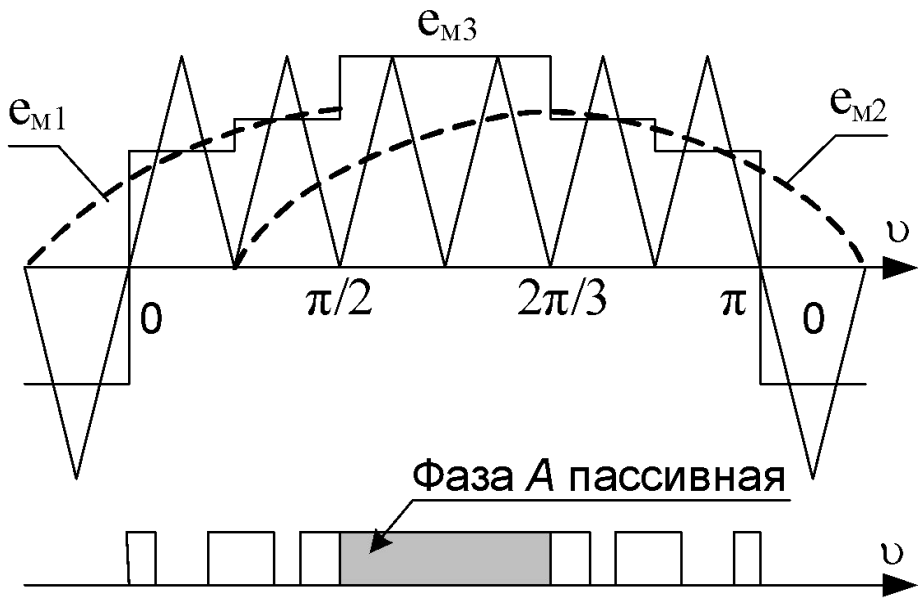


Особенности:

- число коммутаций в АИН на одну треть меньше (как и у векторной ШИМ);
- расширенный на 15 % линейный диапазон регулировочной характеристики (как и у векторной ШИМ).

- на полуволне модулирующего сигнала форма опорного сигнала однополярная;
- центральная часть модулирующего сигнала при регулировании амплитуды не меняется;

Циклическая ШИМ



$$e_{M1} = M \sin\left(\Omega t + \frac{\pi}{6}\right) \qquad \Omega t = 0 \ldots \pi/3$$ *величина зависит от М.*

$$e_{M2} = M \sin\left(\Omega t - \frac{\pi}{6}\right) \qquad \Omega t = 2\pi/3 \ldots \pi$$ *величина зависит от М.*

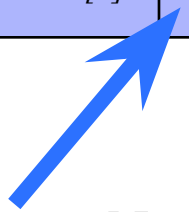
e_{M3} - всегда ≥ $E_{оп}$ $\qquad \Omega t = \pi/3 \ldots 2\pi/3$ *величина не зависит от М.*

Циклическая ШИМ

$$S_{[K]} = \sin\left[\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{N_{CT}}(2K+1)\right], \text{ где } K = \overline{0,(N_{CT}/6-1)}$$

$$N'_{m[K]} = N_{max} S_{[K]}$$

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$N'_{m[K]}$	$N'_{m[0]}$	$N'_{m[1]}$	H	H	$N'_{m[1]}$	$N'_{m[0]}$	$N'_{m[0]}$	$N'_{m[1]}$	H	H	$N'_{m[1]}$	$N'_{m[0]}$

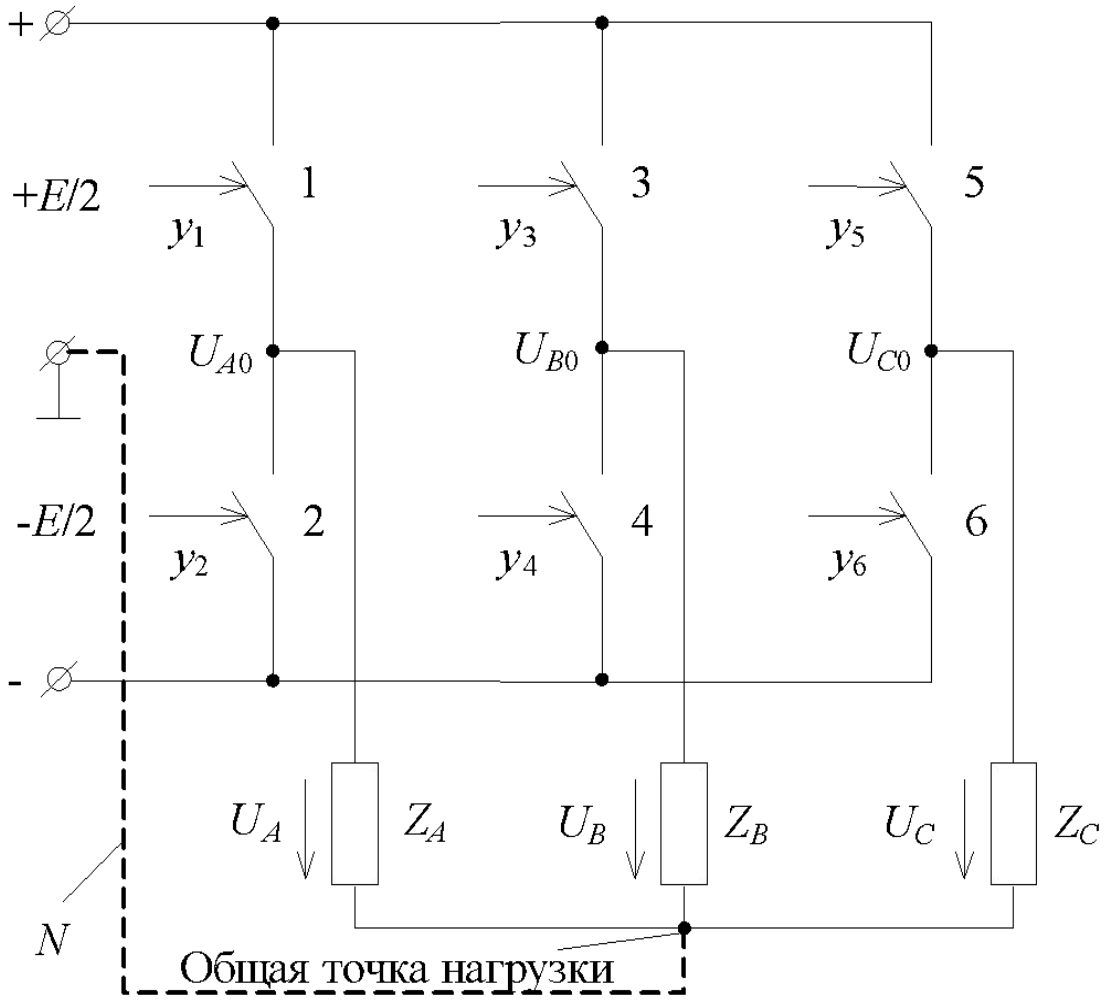


$$N_{m[K]} = MN'_{m[K]} \leftarrow K = \overline{0,(N_{CT}/2-1)}$$

$$N_{m[K]} = N_{max} - MN'_{m[K]} \leftarrow K = \overline{N_{CT}/2,(N_{CT}-1)}$$

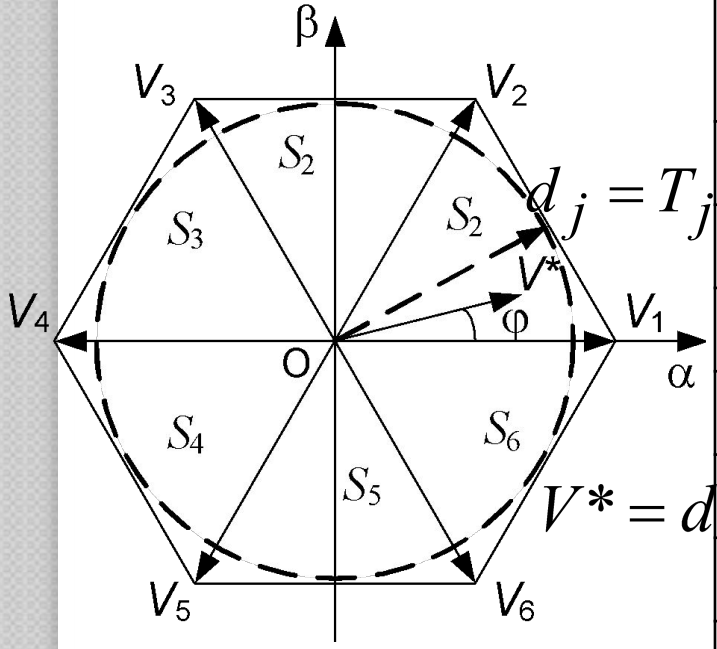
1.5.5. Расчет кода модуляции для векторной ШИМ

Основы представления векторной ШИМ.



Основы представления векторной ШИМ.

Векторы состояния: 000 – V_0 и 111 – V_7 – обеспечивают нулевые напряжения в нагрузке («нулевые» векторы), а V_1 – V_6 обеспечивают ненулевые напряжения («образующие» векторы).



y_A	y_B	y_C	Вектор Состояния	V_i	S_i
1	0	0	04	V_1	S_1
1	1	0	06	V_2	S_2
0	1	0	02	V_3	S_3
0	1	1	03	V_4	S_4
0	0	1	01	V_5	S_5
1	0	1	05	V_6	S_6
1	1	1	07	V_7	
0	0	0	00	V_0	

$$d_j = T_j / T_s$$

где $j = 0 - 7$.

где T_1, T_2, T_0, T_7 - время существования одноименных векторов.

$$V^* = \frac{T_1}{T_s}V_1 + \frac{T_2}{T_s}V_2 + \frac{T_0}{T_s}V_0 + \frac{T_7}{T_s}V_7$$

$$V^* = d_1V_1 + d_2V_2 + d_0V_0 + d_7V_7$$

$$T_s = T_1 + T_2 + T_0 + T_7$$

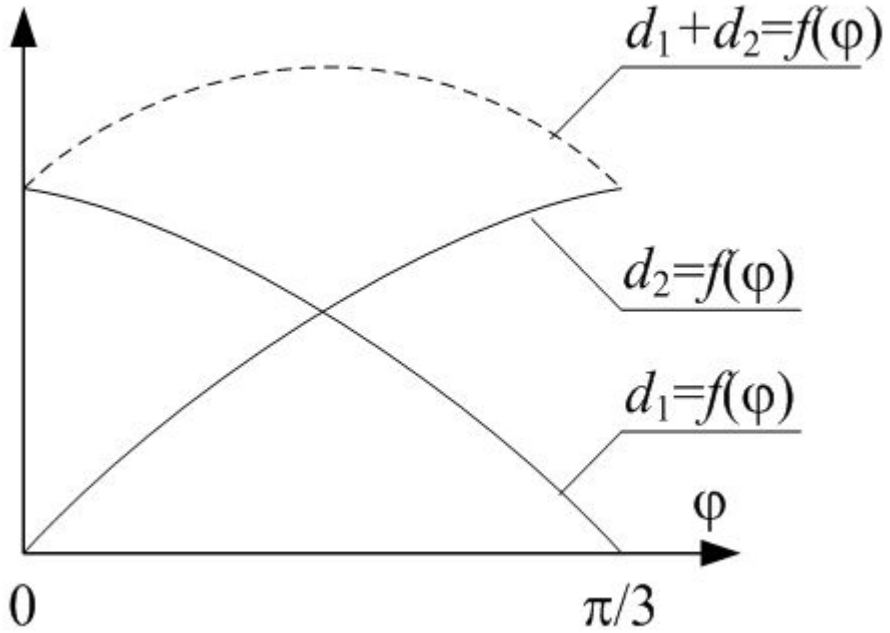
$$d_1 = M \sin\left(\frac{\pi}{3} - \varphi'\right)$$

$$d_2 = M \sin\varphi'$$

$$d_1 + d_2 + d_0 + d_7 = 1$$

Основы представления векторной ШИМ.

Где ϕ′ – угловое положение обобщенного вектора относительно начала сектора



- Относительные длительности нулевых векторов

$$d_0 + d_7 = 1 - d_1 - d_2$$

$$d_2 = M \sin\varphi'$$

$$d_1 = M \sin\left(\frac{\pi}{3} - \varphi'\right)$$

- Порядок распределения векторов (и их длительностей) на интервале усреднения

Основы представления векторной ШИМ.

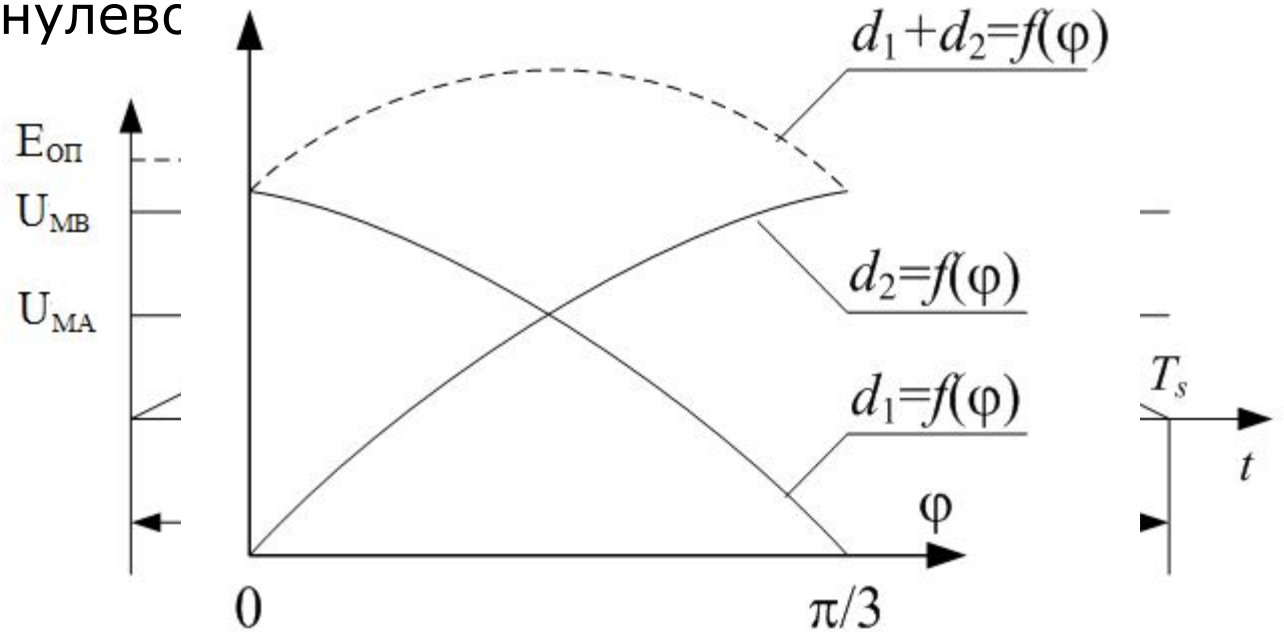
Пример:

- на T_s располагается только один нулевой вектор (или V_0, или V_7);
- образующие вектора чередуются по номеру от меньшего к большему;
- делится на два участка, симметричных относительно центра;
- в начале интервала усреднения располагается ненулевс

$$U_{MA} = d_1 = M \sin\left(\frac{\pi}{3} - \varphi\right)$$

$$U_{MB} = d_2 = M \sin(\pi/3 - \varphi) + A\sin\varphi = \ldots = M \sin(\pi/3 + \varphi)$$

Порядок расположения векторов (и их длительностей) на интервале усреднения



Порядок чередования векторов состояний инвертора по секторам

S_i	j	y_A	y_B	y_C	V_i	S_i	j	y_A	y_B	y_C	V_i
S_1	1	**1**	0	0	V_1	S_4	1	**0**	1	1	V_4
	2	**1**	1	0	V_2		2	**0**	0	1	V_5
	3	**1**	1	1	V_7		3	**0**	0	0	V_0
	4	**1**	1	0	V_2		4	**0**	0	1	V_5
	5	**1**	0	0	V_1		5	**0**	1	1	V_4
S_2	1	1	1	**0**	V_2	S_5	1	0	0	**1**	V_5
	2	0	1	**0**	V_3		2	1	0	**1**	V_6
	3	0	0	**0**	V_0		3	1	1	**1**	V_7
	4	0	1	**0**	V_3		4	1	0	**1**	V_6
	5	1	1	**0**	V_2		5	0	0	**1**	V_5
S_3	1	0	**1**	0	V_3	S_6	1	1	**0**	1	V_6
	2	0	**1**	1	V_4		2	1	**0**	0	V_1
	3	1	**1**	1	V_7		3	0	**0**	0	V_0
	4	0	**1**	1	V_4		4	1	**0**	0	V_1
	5	0	**1**	0	$V3$		5	1	**0**	1	$V6$

Микропроцессорная реализация векторной ШИМ в МК общего назначения

Необходимы:

- генератор треугольного опорного напряжения, в которой необходимо задать: $N_{\max}$, $(N_{\text{дел}}, INT1)$;
- два модулирующих сигнала:
$$U_{MA} = M\sin(\pi/3 - \varphi')$$
$$U_{MB} = M\sin(\pi/3 + \varphi')$$
- порты вывода ССВ.

- таблица чередования векторов состояния или таблицы слов состояния вентилей (ССВ);
- два мифровых компаратора с возможностью прерывания по сравнению: INT_{CMP1}, INT_{CMP2};

Задаем $N_{\text{ст}}$, а две таблицы значений ступенек рассчитываем по формулам:

$$K = \overline{0,(N_{\text{ст}}/6 - 1)}.$$

$$\boxed{\begin{aligned} N'_{m[K]A} &= N_{\max}\sin\left[\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{N_{\text{СТ}}}(2K+1)\right] \\ N'_{m[K]B} &= N_{\max}\sin\left[\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{N_{\text{СТ}}}(2K+1)\right] \end{aligned}}$$

Микропроцессорная реализация векторной ШИМ

Алгоритм реализации в МК:

1. Определяется текущее значение угла ϕ;
2. Вычисляются сектор S_j, угол ϕ′, номер ступеньки K;
3. Из таблиц извлекаются $N'_{m[K]A}$, $N'_{m[K]B}$, j-я последовательность слов состояния вентилей ($ССВ_1$ – $ССВ_5$);
4. Вычисляются и сохраняются соответствующие коды модуляции:

$$N_{m[K]A} = MN'_{m[K]A}$$

$$N_{m[K]B} = MN'_{m[K]B}$$

В подпрограммах по прерыванию необходимо выполнить следующие задачи:

подпрограмма по *INT*1 – в регистры сравнения компараторов записываются коды $N_{m[K]A}$, $N_{m[K]B}$, в порт записывается $ССВ_1$;

подпрограмма по INT_{CMP1} – в порт записывается $ССВ_2$;

подпрограмма по INT_{CMP2} – в порт записывается $ССВ_3$;

подпрограмма по INT_{CMP2} – в порт записывается $ССВ_4$;

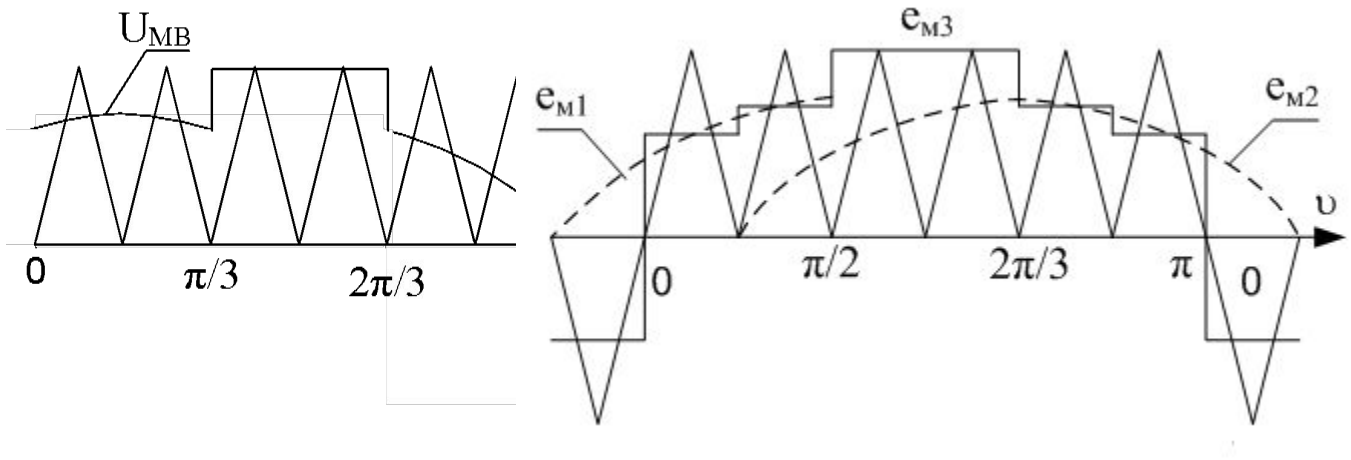
подпрограмма по INT_{CMP1} – в порт записывается $ССВ_5$.

Недостаток: 4 (!) дополнительных прерывания на *Ts*.

Эти недостатки устранены в МК со специализированными ШИМ-модулями (*TMS320F2812*)

Расчет кода модуляции для векторной ШИМ

Векторную ШИМ можно представить и во временной области.



Выбор вида представления способа управления (временного или векторного) при микропроцессорной реализации зависит от способа регулирования всей энергетической системы, в которой присутствует АИН.

1.5.6. Умножение на десятичную дробь

1. Замена умножения делением.

$MS_{[K]} = \frac{S_{[K]}}{1/M}$, где $1/M$ – число больше единицы.

2. Разложение десятичной дроби на степени числа 2 с отрицательным показателем.

Пример:

$$0,75 = 0,5 + 0,25 = 2^{-1} + 2^{-2},$$

$$0,45 \cong 0,25 + 0,125 + 0,0625 = 2^{-2} + 2^{-3} + 2^{-4}$$

$$Q0.75 = Q0.5 + Q0.25 = \left(Q^{\to 1} + Q^{\to 2}\right)$$

Разложив дробь, получаем алгоритм обработки множимого: величина степеней показывает, сколько раз нужно сдвинуть вправо, а число степеней - количество слагаемых.

Эти способы умножения используются, когда дроби известны и программист заранее может составить алгоритм их реализации.

Умножение на десятичную дробь

Пример:

Суть:

- восьмиразрядная шина данных.
- при перемножении байтов произведение будет двухбайтным и сохраняется в двухбайтном регистре.

Представим, что числа от 0 до 255 соответствуют десятичным дробям от 0 до 1, т.е. 255 (*$FF*) ~ 1.

Также известно:

Данный способ более универсален. Единственным условием здесь является «привязка» единицы глубины модуляции к максимальному числу шины данных.

(Q/2 − 1*)* и т.д.

Диапазон изменения глубины модуляции «привязывается» к диапазону чисел 0 …255 (код глубины модуляции выполняется в качестве результата используется старший байт произведения (с возможным инкрементом).

3. Использование особенностей целочисленного умножения двоичных чисел.

Умножение на десятичную дробь

4. Универсальный вариант

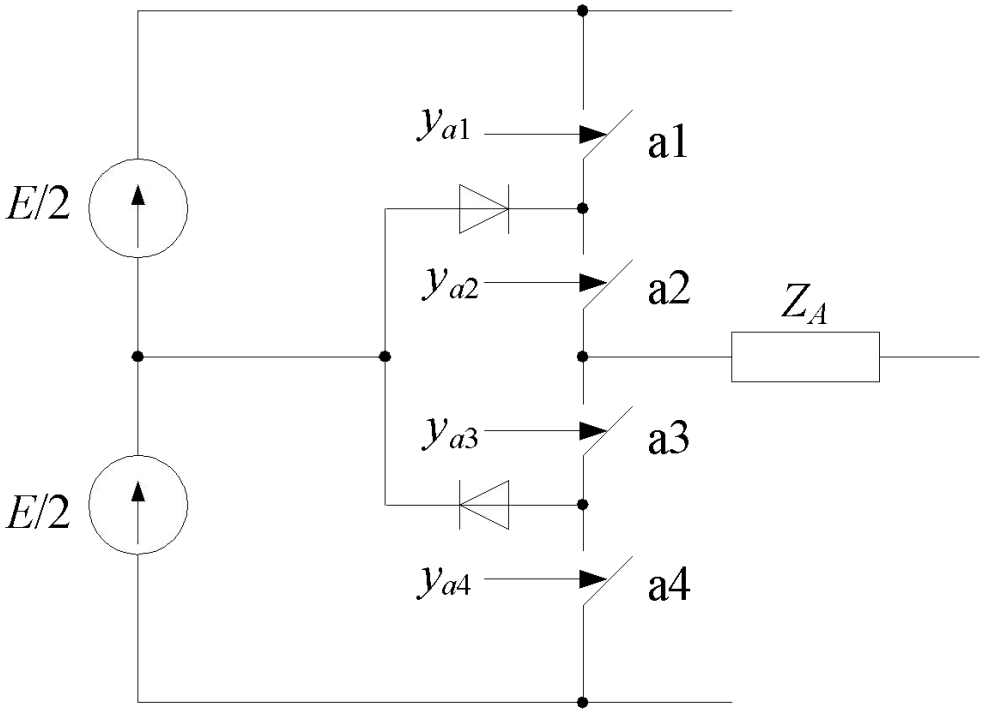
$$QM = QN_{\text{М}} / N_{\text{М\_1}}$$

$N_{\text{м\_1}}$ - Код, соответствующий единичной глубине модуляции

Одно действие заменяется двумя: умножением и делением.
Нужно строго выполнять этот порядок выполнения операций

Особенности микропроцессорной реализации синусоидальной ШИМ в трехуровневом инверторе напряжения.

1. Коммутационная модель трехуровневого инвертора напряжения



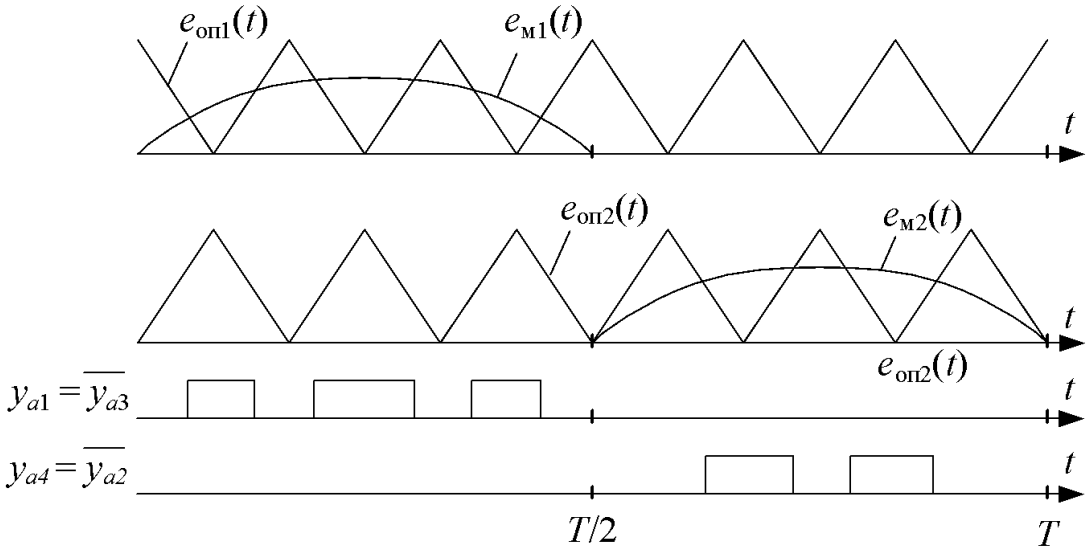
$$y_{a3} = \overline{y_{a1}},$$

$$y_{a4} = \overline{y_{a2}}.$$

Для управления ЗУ-АИН требуется шесть комплементарных пар импульсов.

Особенности микропроцессорной реализации синусоидальной ШИМ в трехуровневом инверторе напряжения.

2. Форма модулирующих и опорных сигналов



Необходимые аппаратные средства для ЗУ-АИН

- Наличие двух специализированных ШИМ-модулей «*Motion Control*»

- В ШИМ-модулях опорные сигналы должны быть между собой синхронизированы во времени, но в то же время противофазны друг к другу

- Один ШИМ-модуль должен работать с положительными полуволнами, а второй – с модулями отрицательных полуволн модулирующих сигналов

Спасибо за внимание!