

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)

1.5. РАСЧЕТ КОДА МОДУЛЯЦИИ

- 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.



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

**1.5.2. Синусоидальная ШИМ,
биполярный опорный сигнал**

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

(K - относительное дискретное время)

Исходные положения:

1. Уравнение фазовой модуляции - $e_M(t) = e_{оп}(t)$, его решение - положение фронтов прямоугольных импульсов на периоде $T_{оп}$.
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.

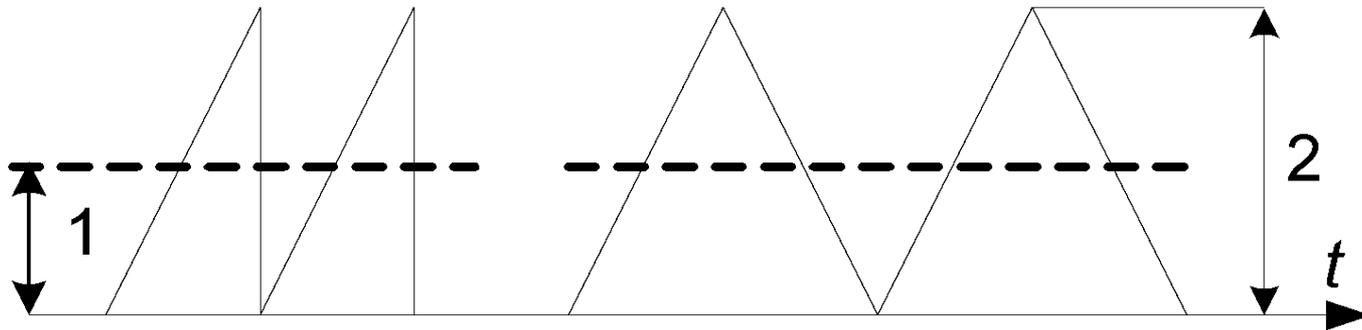
Замечание. Если уравнение $F_1(x) = F_2(x)$ имеет решение $x=Q$, то уравнение $F_1(x) + C = F_2(x) + \bar{C}$ (где \bar{C} – константа) имеет то же самое решение.

Пусть $E_{оп} = 1$, тогда $E_m = M$.

Выражение для модулирующего сигнала:

$$M_{[K]} = MS_{[K]}$$

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:

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

Код периода опорного сигнала определяется из выражения:

$$T_{\text{оп}} = N_{\text{max}} T_{\text{T}} K_{\text{ТШ}}$$

где T_{T} – 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:

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
$N_{ст} = 12$		$K = 0, (N_{ст} - 1) = 0, 11$			
$N_{max} = 0, 259$	0, 259	161	A1	04	DA
$M = 0, 707$	0, 707	218	DA	04	A1
модулирующий сигнал трехфазный	0, 966	252	FC	25	5F
3	0, 966	252	FC	5F	25
4	0, 707	218	DA	A1	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	A1
9	-0, 966	04	04	A1	DA
10	-0, 707	37	25	5F	FC
11	-0, 259	95	5F	25	FC

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

Пример расчета кода модуляции.

Математически сдвиг фазы B относительно фазы A выражается $\phi_B = -120^\circ$.

$$\varphi_B = -120^\circ = -120^\circ + 360^\circ = 240^\circ$$

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)

Способы извлечения основаны на следующем:

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	A1	04	DA
Приоритетной организации извлечения данных из	0,707	37	25	FC	5F
таблицы выигрываем в работе со	0,966	04	04	DA	A1
счетчиками 252 номеров FC ступеней 5F.e. в	0,966	04	04	DA	A1
быстродействии), но проигрываем в объеме	0,707	37	25	FC	5F
памяти, отводимой под таблицу.	0,259	95	5F	FC	25
6	-0,259	95	5F	FC	25
7	-0,707	37	25	FC	5F
8	-0,966	04	04	DA	A1
9	-0,966	04	04	A1	DA
10	-0,707	37	25	5F	FC
11	-0,259	95	5F	25	FC

"Три счетчика – одна таблица".

Используем симметрию МС по фазам

Достоинства и недостатки противоположны предыдущему варианту.

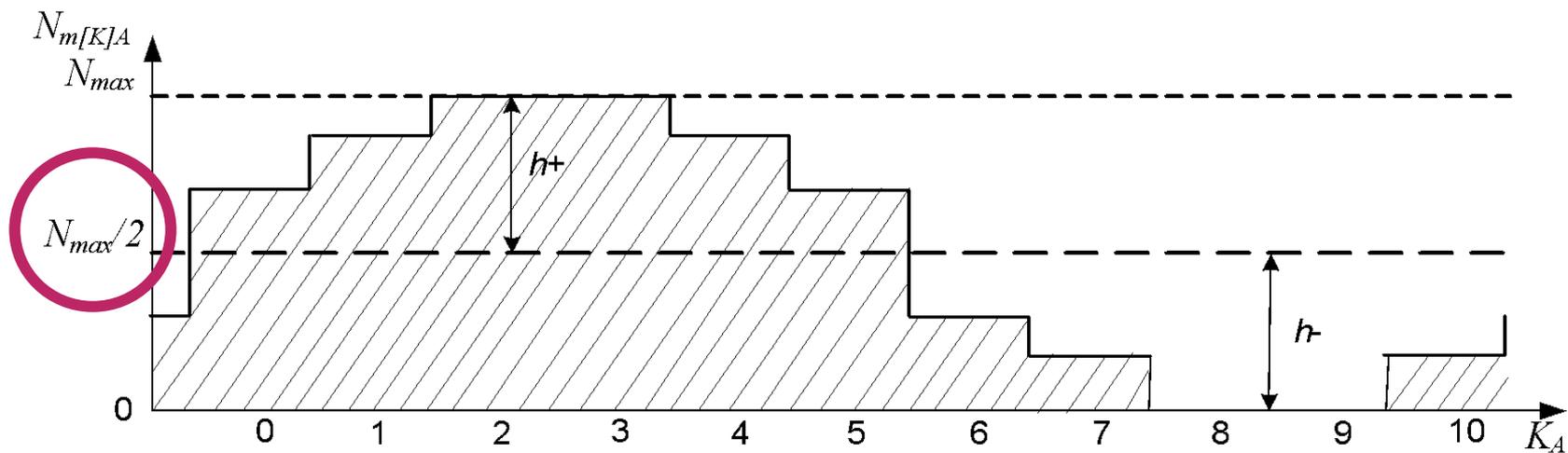
K_A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
K_B	8	9	10	11	0	1	2	3	4	5	6	7
K_C	4	5	6	7	8	9	10	11	0	1	2	3

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

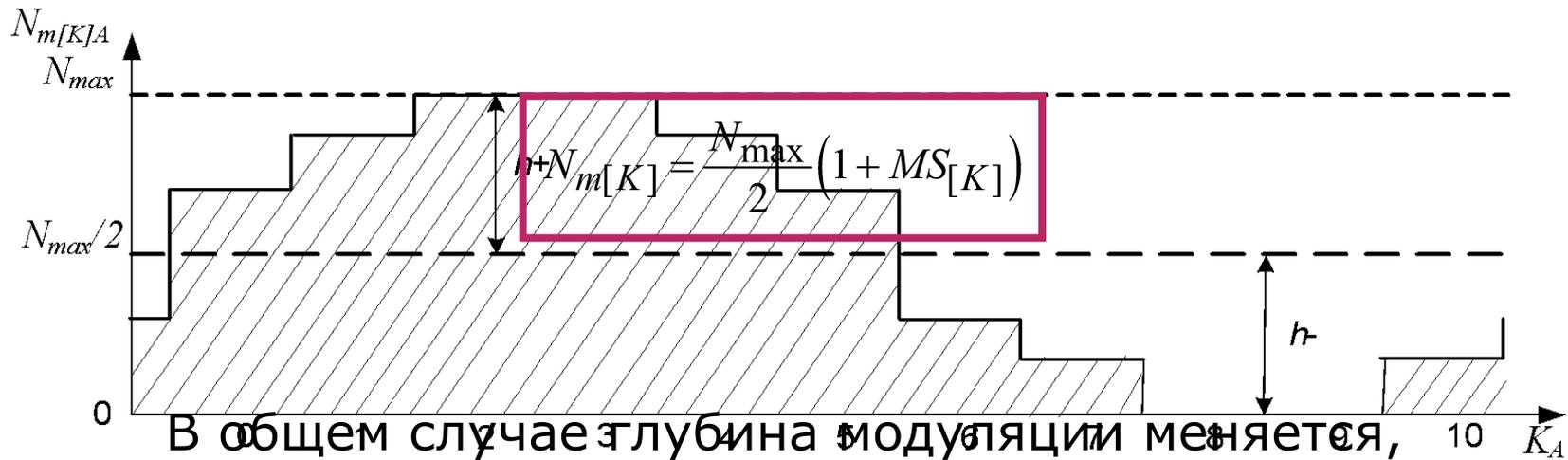
Запомним! Любое уменьшение массивов при использовании соответствующей симметрии приводит к усложнению соответствующей программы и наоборот.

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

$$(N_{\text{CT}}=12, M=1)$$



Как решить проблему беззнакового умножения?



В общем случае глубина модуляции меняется, $10 K_A$

=> надо вычислять произведение $MS_{[K]}$.



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

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

Алгоритм расчета кода модуляции для варианта «три счетчика – одна таблица»:

6. Выбрать текущее значение кода фазы A ,
продвинуть вперед значение счетчика K_A на $N_{ст}$
если $K_A \neq 0$.

2. Для K_A и K_B использовать таблицу значений $m[K]$.

3. Умножить код глубины модуляции на табличное значение.

4. **Замечание.** Определить полярность текущей ступеньки фазы A .
При инициализации этой процедуры

исходное состояние счетчиков ступеней должно быть
5. Вычислить и сохранить значение кода модуляции
установлено следующим: $K_A = 0$, $K_B = 2N_{ст}/3$, $K_C = N_{ст}/3$
для фазы A :

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

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

«+», иначе со знаком «-».

Алгоритм расчета кода модуляции для варианта «один счетчик – три таблицы»:

В этом случае условие $0 \leq K_A \leq \frac{N_{СТ}}{2} - 1$ справедливо только для фазы А. Для фаз В и С условия определения полярности выглядят иначе.

Фаза В:
если $\frac{N_{СТ}}{3} \leq K_B \leq \frac{5N_{СТ}}{6}$, то «+», иначе «-».

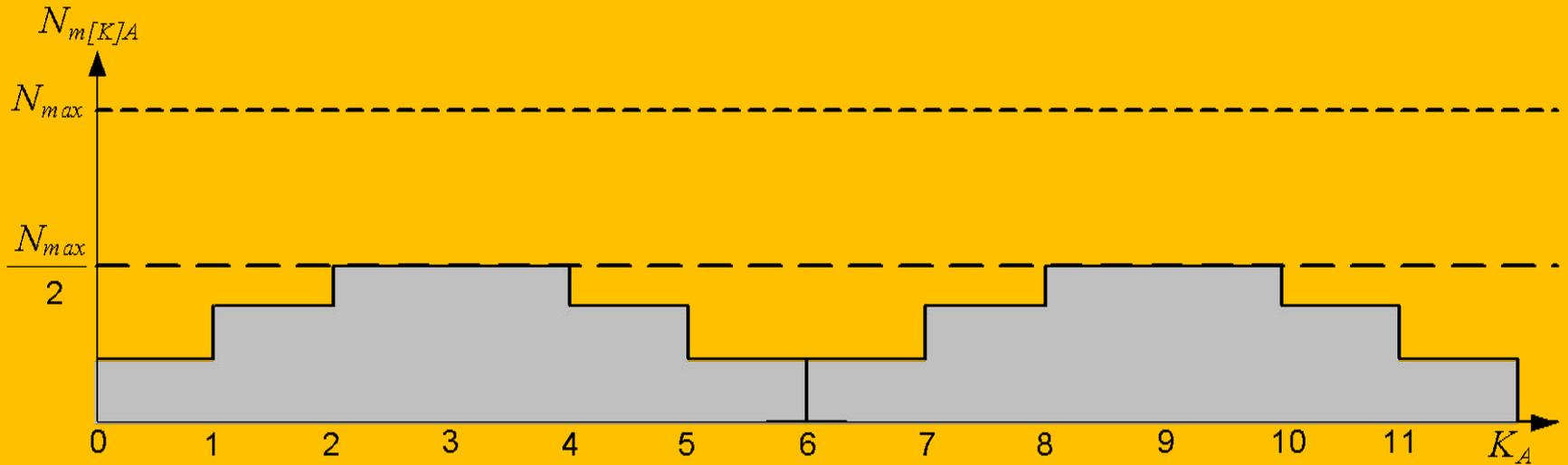
Фаза С:
если $\frac{N_{СТ}}{6} \leq K_C \leq \frac{2N_{СТ}}{3}$, то «-», иначе «+».

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

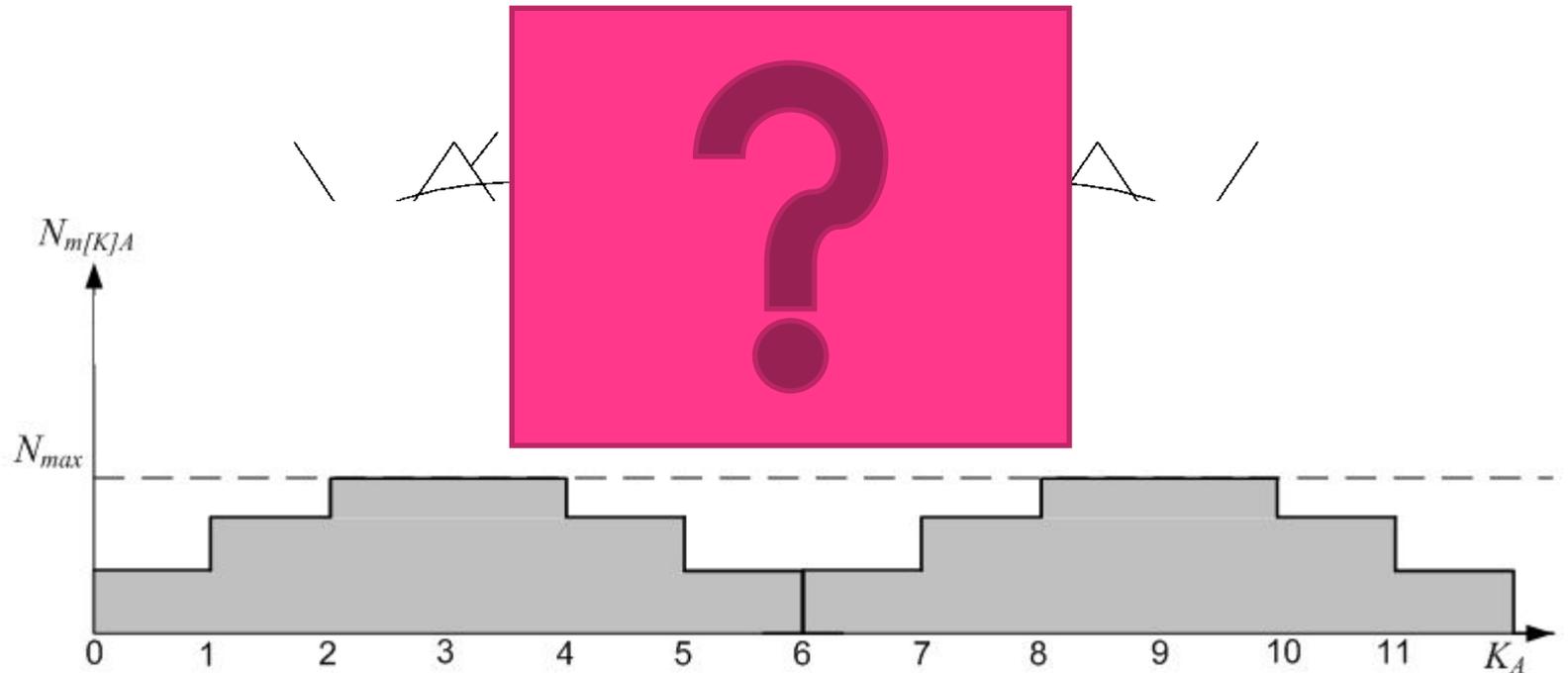
ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ разных вариантов РАСЧЕТА КОДА МОДУЛЯЦИИ

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

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	0	0	10	11	0	1	2	2	4	5	6	7



1.5.3. Синусоидальная ШИМ, однополярный опорный сигнал



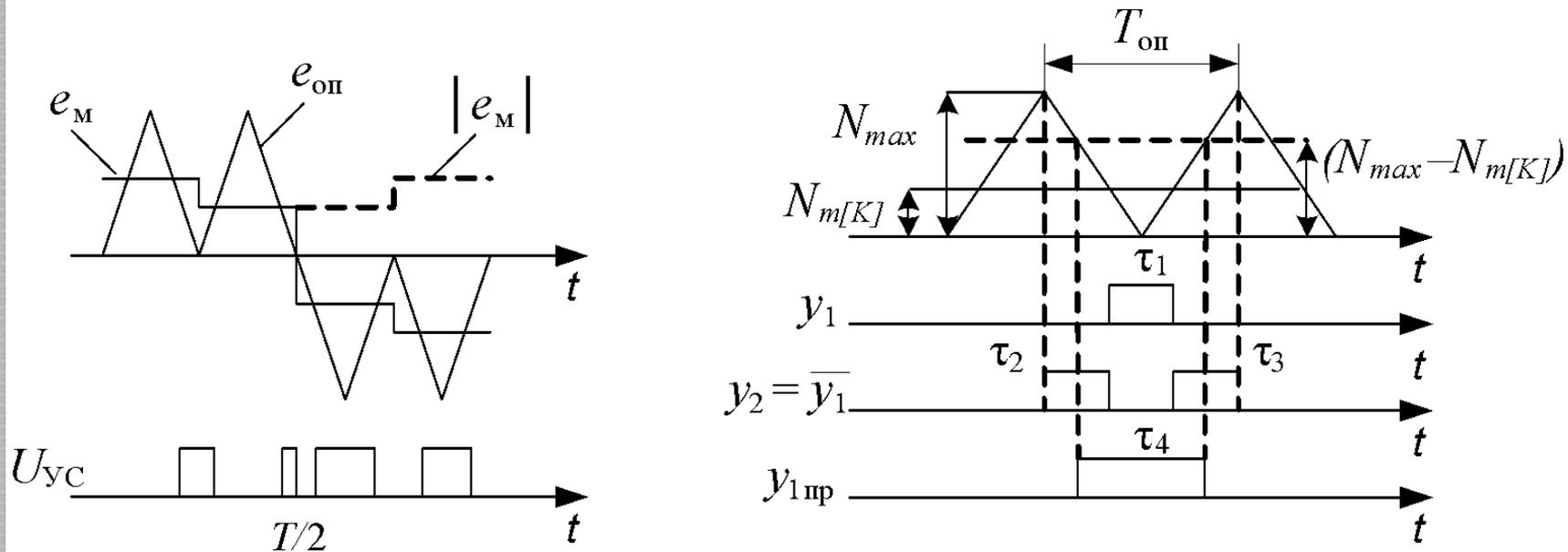
Для расчета кода модуляции для положительной полуволны справедливо выражение:

$y_A = U_A$ $y_B = N_m[K] = N_{max} MS[K] = MN_m[K]$

Квасисимметричное управление

где $K_H = 0,5(N_{ст} + 1)$

Расчет кода модуляции для отрицательной полуволны



$$\tau_{\text{оп}} + \tau_2 + \tau_3 = T$$

$$\tau_{\text{оп}} + \tau_3 \neq T - \tau$$

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



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

Программная инверсия – на периоде $T_{оп}$ получаем не два импульса, а один. $\tau_4 = \tau_2 + \tau_3$, значит $U_{шр}$ и U_2 равны по длительности на периоде опорного сигнала.

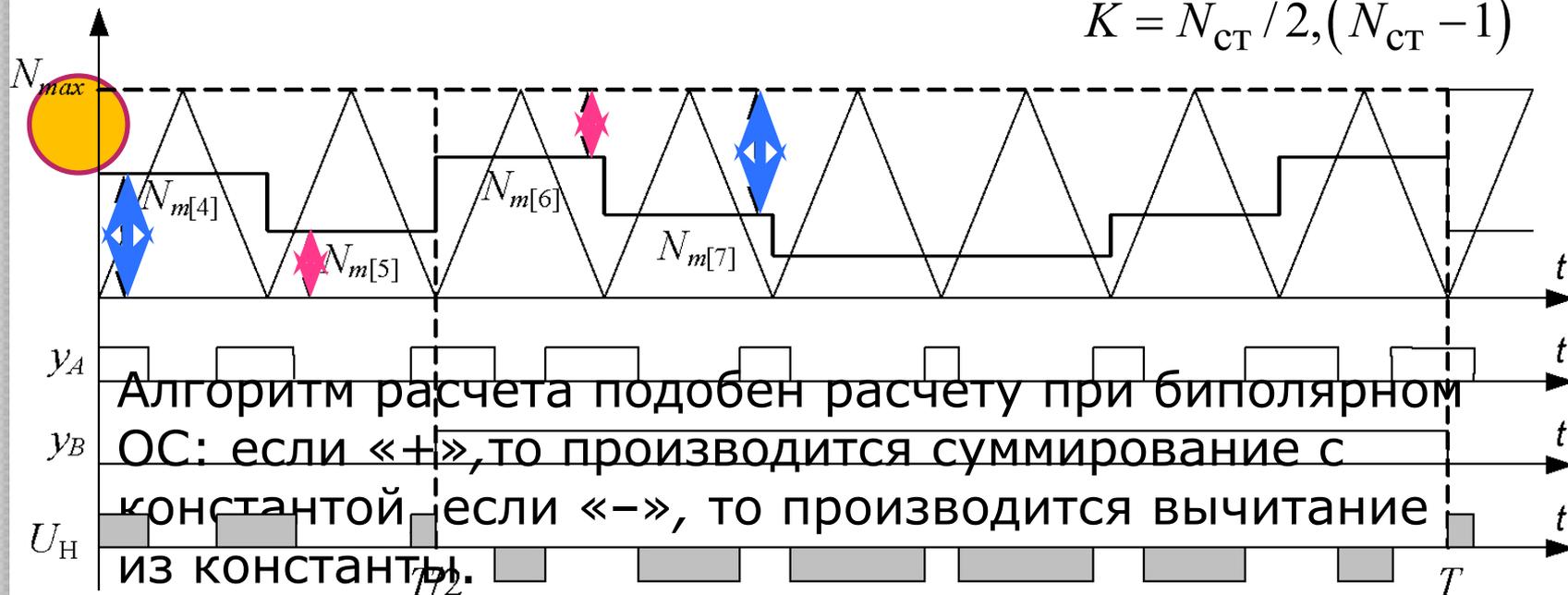
Так как площади импульсов не изменились, то не изменится первая гармоника и не появится постоянная составляющая

Расчет кода модуляции для отрицательной полуволны

Код модуляции для отрицательной полуволны при однополярном опорном сигнале:

$$N_m[K] = N_{\max} - MN'_m[K]$$

$$K = \overline{N_{\text{СТ}} / 2, (N_{\text{СТ}} - 1)}$$



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

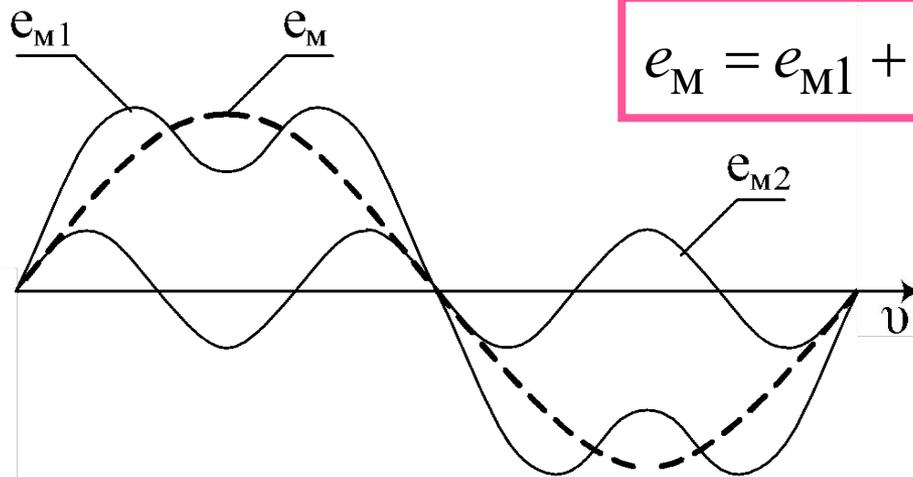
1.5.4. Расчет кода модуляции для способов ШИМ со сложной формой модулирующего сигнала

Синусоидальная ШИМ с добавлением третьей гармоники.

- для модулирующего сигнала:

$$e_M = e_{M1} + e_{M2} = M (\sin \Omega t + L \sin 3\Omega t)$$

где коэффициент
 $L = 1/6 = 0,167$



Необходимо увеличить N_{CT} минимум в 2-3 раза

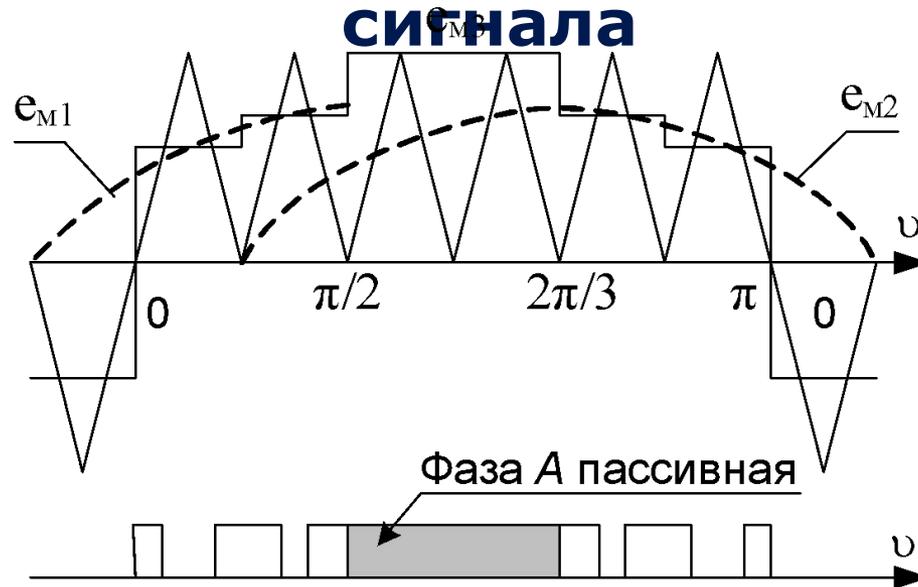
- при ступенчатой аппроксимации:

где $K = \overline{0, (N_{CT} - 1)}$

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

Расчет кода модуляции для способов ШИМ со сложной формой модулирующего сигнала

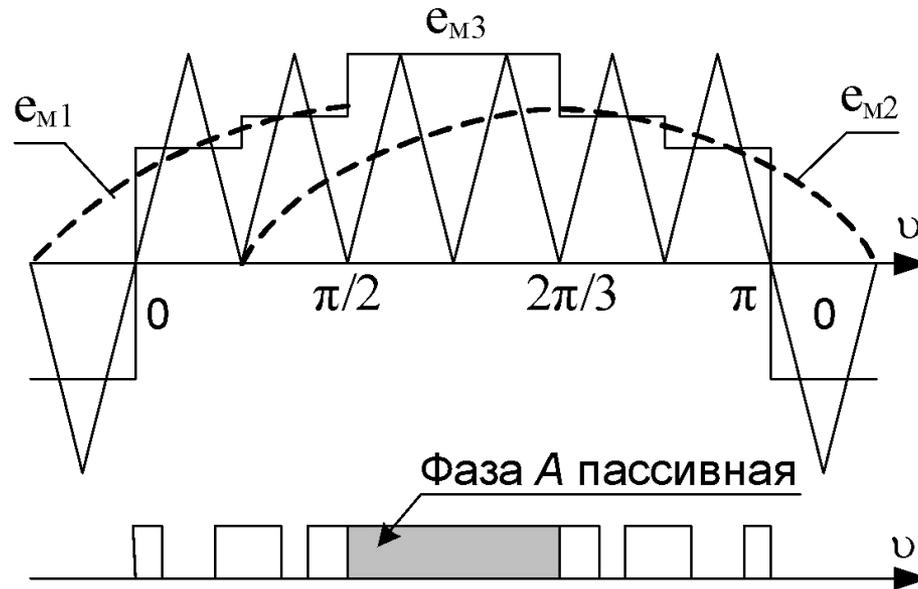
Циклическая ШИМ



Особенности:

- на допустимой скорости вращения двигателя форма сигнала (как и у вектора ω ШИМ) гармоничная;
- равномерная нагрузка 50% для каждой фазы при регулировании характеристик двигателя (как и у векторной ШИМ).

Циклическая ШИМ



$$e_{M1} = M \sin\left(\Omega t + \frac{\pi}{6}\right) \quad \Omega t = 0 \dots \pi/3 \quad \text{величина зависит от } M.$$

$$e_{M2} = M \sin\left(\Omega t - \frac{\pi}{6}\right) \quad \Omega t = 2\pi/3 \dots \pi \quad \text{величина зависит от } M.$$

$$e_{M3} - \text{ всегда } \geq E_{\text{оп}} \quad \Omega t = \pi/3 \dots 2\pi/3 \quad \text{величина не зависит от } M.$$

Циклическая ШИМ

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

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

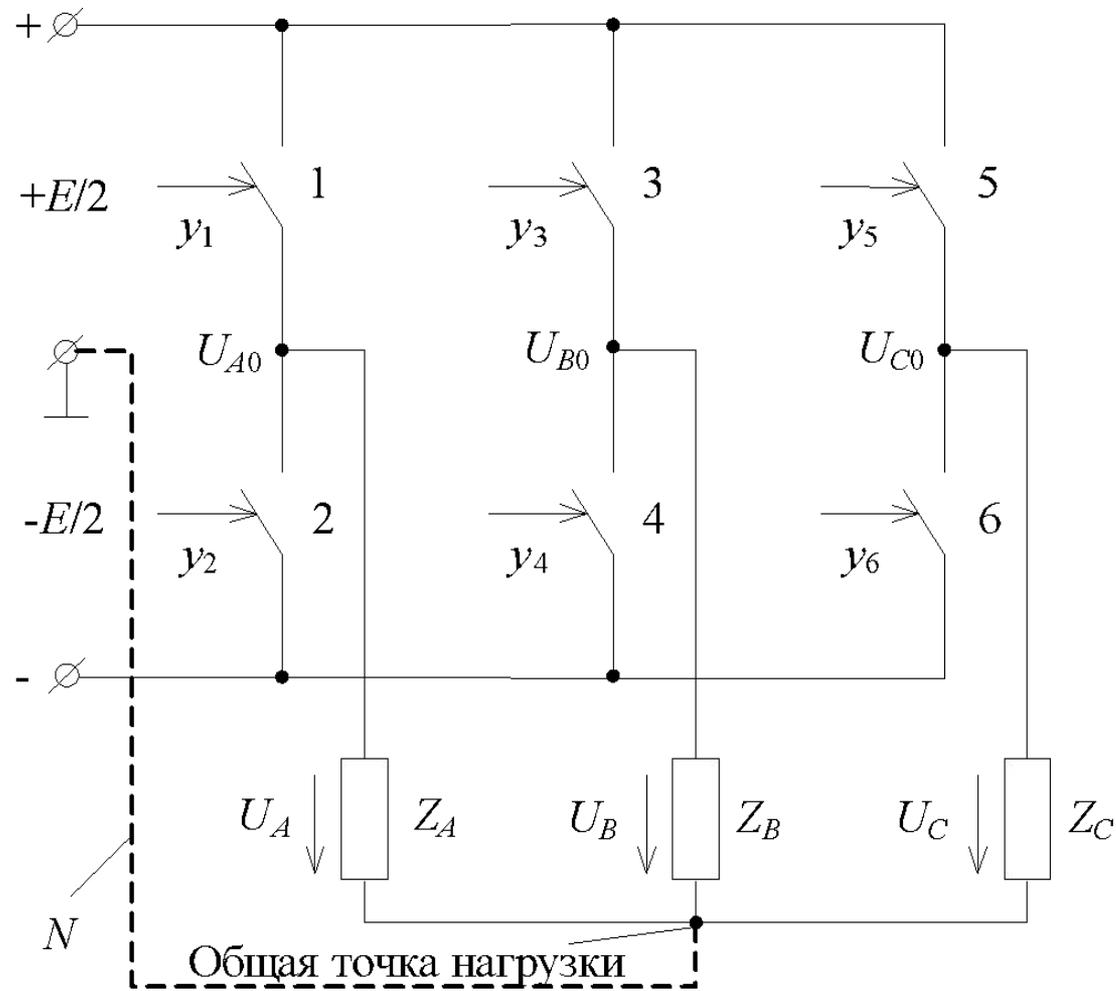
№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$N'_{m[K]}$	$N'_{m[0]}$	$N'_{m[1]}$	H	H	$N'_{m[1]}$	$N'_{m[0]}$	$N'_{m[0]}$	$N'_{m[1]}$	H	H	$N'_{m[1]}$	$N'_{m[0]}$

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

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

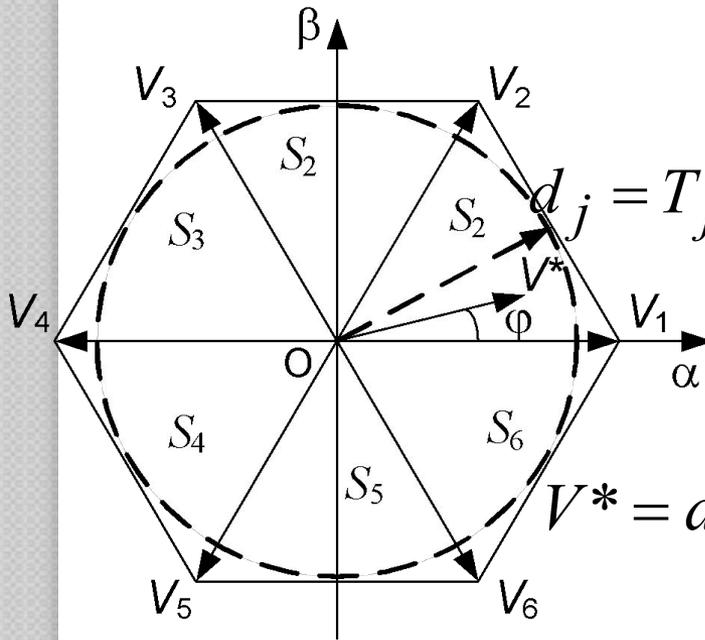
1.5.5. Расчет кода модуляции для векторной ШИМ

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).

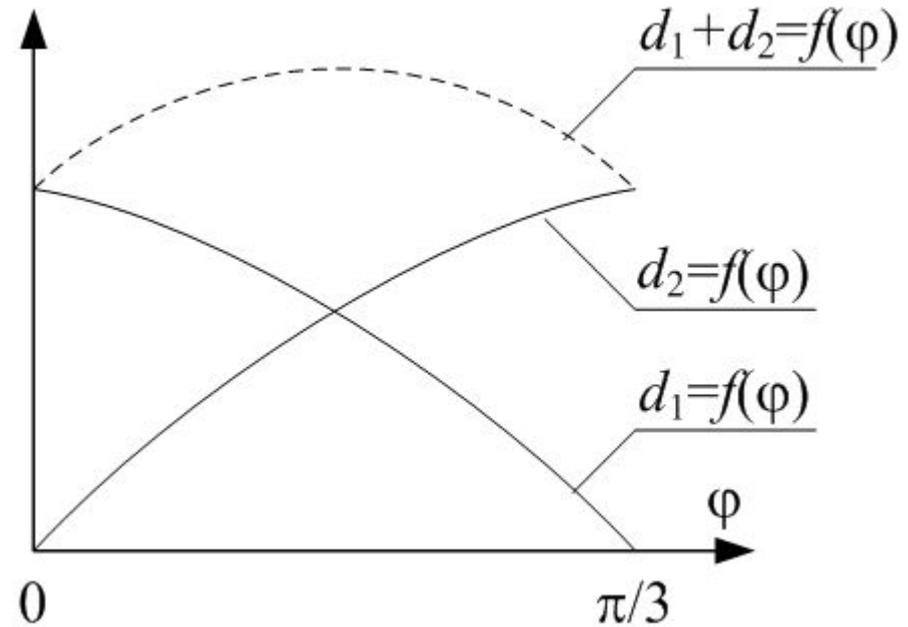


$$d_1 = M \sin\left(\frac{\pi}{3} - \varphi'\right)$$

Y_A	Y_B	Y_C	Вектор	V_i	S_i
0	0	0	Состояния	$T_0 V_0$	$T_7 V_7$
1	0	0	где $j \neq 0$	$T_1 V_1$	$T_2 V_2$
0	1	0	где φ_1, T_2, T_7 - время	$T_3 V_3$	$T_4 V_4$
0	0	1	существования одноименных	$T_5 V_5$	$T_6 V_6$
0	0	0	векторов.	$T_1 V_1$	$T_2 V_2$
1	0	1		$T_3 V_3$	$T_4 V_4$
1	1	1		$T_5 V_5$	$T_6 V_6$
d_2	d_1	d_0		$d_1 + d_2 + d_0 + d_7 = 1$	

Основы представления векторной ШИМ.

Где ϕ' – угловое положение обобщенного вектора относительно начала сектора



- Относительные длительности нулевых векторов

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

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

Основы представления векторной ШИМ.

Пример:

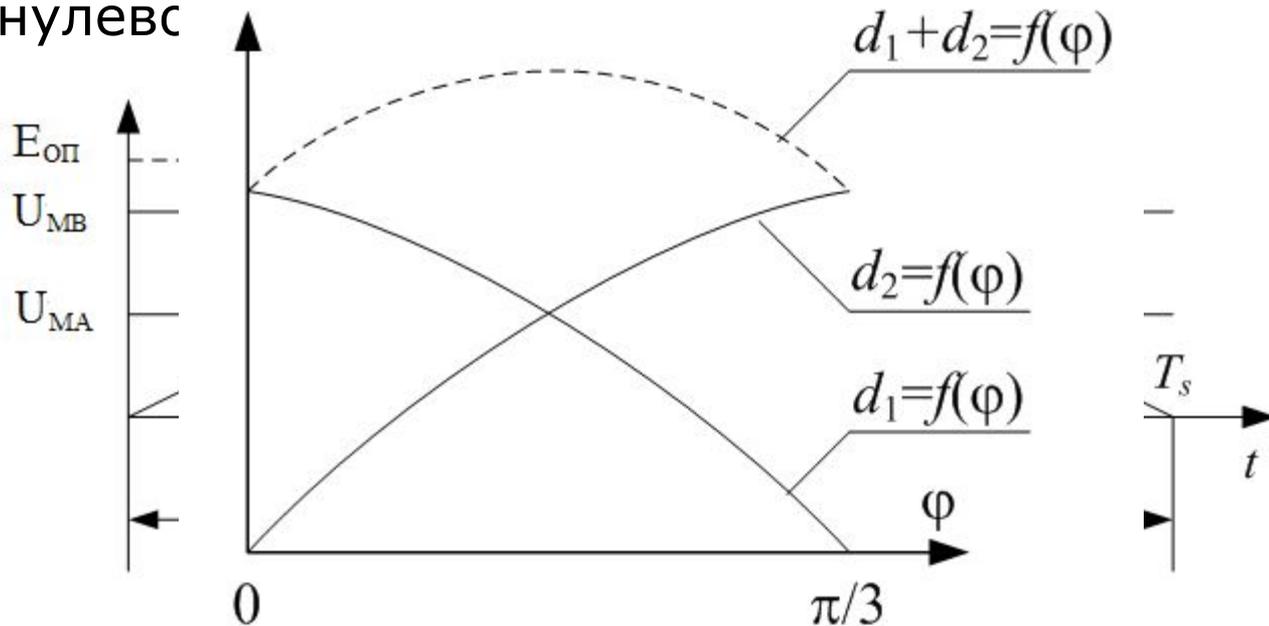
- на T_s располагается только один нулевой вектор (или V_0 , или V_7);
- образующие вектора чередуются по номеру от

Порядок распределения векторов (и их длительностей) на интервале усреднения

$U_{MB} = a_1 + a_2 = M \sin(\pi/3 - \varphi) + M \sin \varphi = M \sin(\pi/3 + \varphi)$

• U_{MB} делится на два участка, симметричных относительно центра;

- в начале интервала усреднения располагается ненулевой



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	V_3		5	1	0	1	V_6

Микропроцессорная реализация векторной ШИМ в МК общего назначения

Необходимы:

- таблица перекодирования векторов состояния, в которой вобходима видель $(\frac{N_{CT}}{3}, \frac{N_{CT}}{дел})$ и $INT1$;
- два микропроцессора: с возможностью прерывания по сравнению $INT1 / 3$ и INT_{CMP2} ;
- порты вывода ССВ. $U_{MB} = M \sin(\pi / 3 + \varphi')$

Задаем N_{CT} , а две таблицы значений ступенек рассчитываем по формулам:

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

$$N'_{m[K]A} = N_{max} \sin \left[\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{N_{CT}} (2K + 1) \right]$$

$$N'_{m[K]B} = N_{max} \sin \left[\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{N_{CT}} (2K + 1) \right]$$

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 (ССВ₁ – ССВ₅);
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 CCB_1 ;

подпрограмма по INT_{CMP1} – в порт записывается CCB_2 ;

подпрограмма по INT_{CMP2} – в порт записывается CCB_3 ;

подпрограмма по INT_{CMP2} – в порт записывается CCB_4 ;

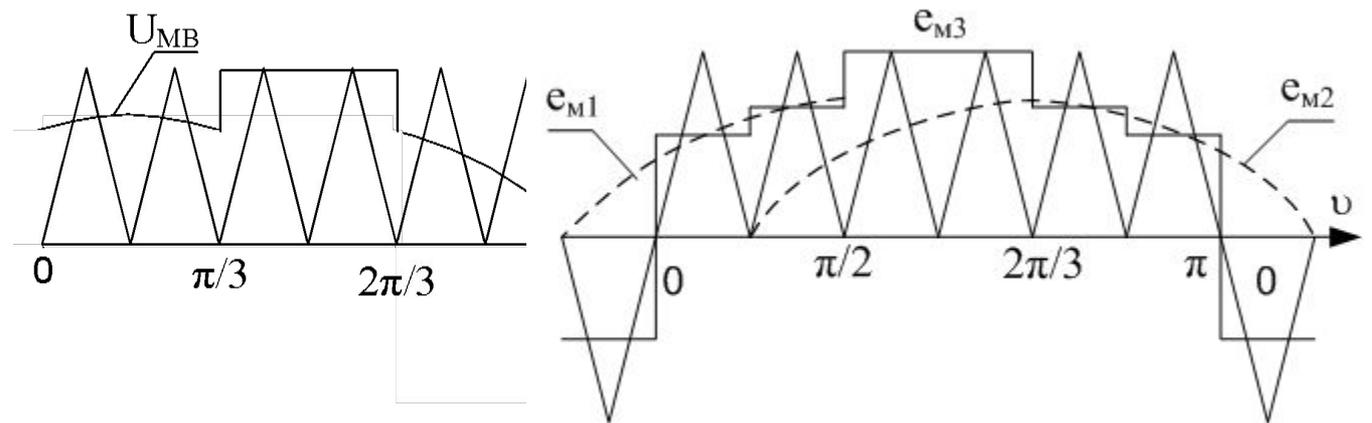
подпрограмма по INT_{CMP1} – в порт записывается CCB_5 .

Недостаток: 4 (!) дополнительных прерывания на T_s .

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.

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

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

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

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

$$Q0.75 = Q0.5 + Q0.25 = (Q^{-1} + Q^{-2})$$

Разложив дробь, получаем алгоритм обработки. Эти способы умножения используются, когда множимого: величина степеней показывает, сколько раз дроби известны и программист заранее может составить алгоритм их реализации. нужно сдвинуть вправо, а число степеней - количество слагаемых.

Умножение на десятичную дробь

Пример:

- восьмиразрядная шина данных
- диапазон изменения глубины модуляции
- при перемножении байтов произведение будет «привязывается» к диапазону чисел 0 ... 255 (код двухбайтным и сохраняется в двухбайтном регистре глубины).

3. Использование особенностей целочисленного умножения двоичных чисел. В качестве результата используется старший байт произведения (с возможным инкрементом). Соответствуют десятичным дробям от 0 до 1, т.е. $255 (\$FF) \sim 1$.

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.

Умножение на десятичную дробь

4. Универсальный вариант

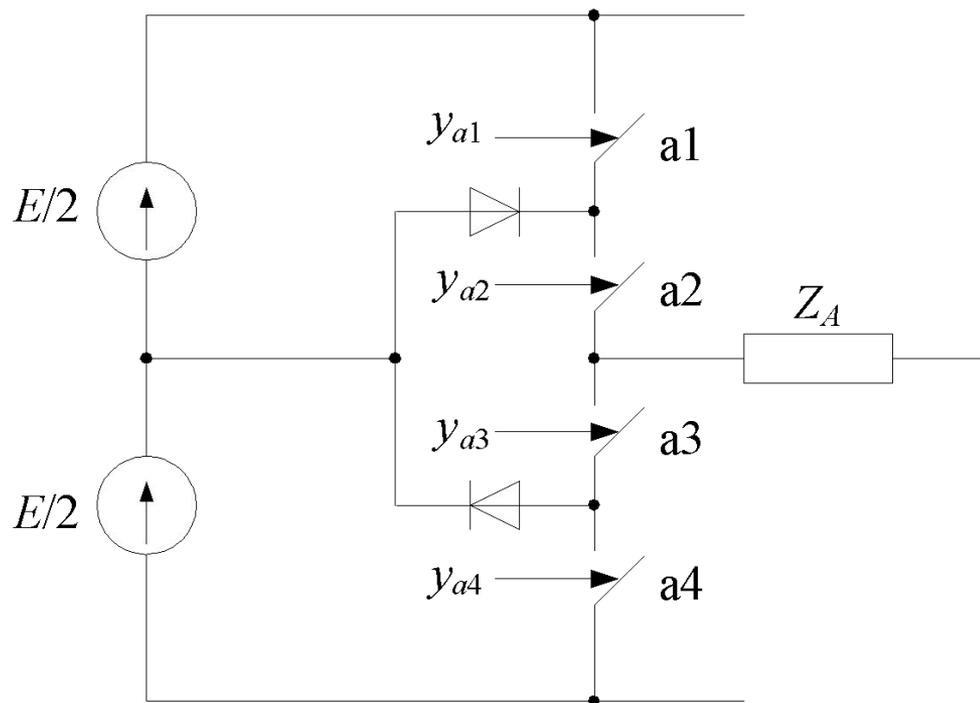
$$QM = QN_M / N_{M-1}$$

N_{M-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

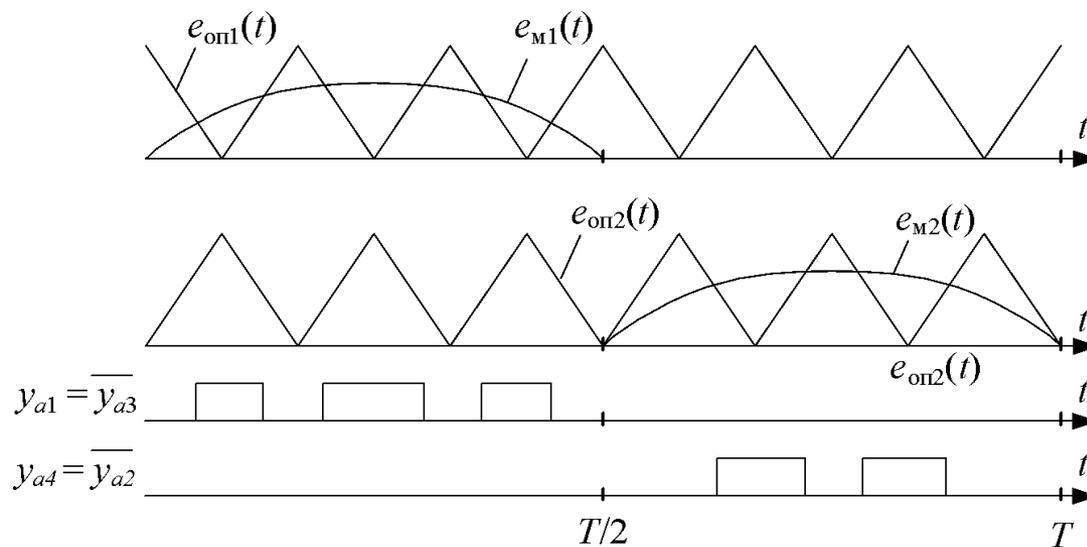


$$y_{a3} = \overline{y_{a1}},$$

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

Для управления ЗУ-АИН требуется шесть комплементарных пар импульсов.

Особенности микропроцессорной реализации синусоидальной ШИМ в трехуровневом инверторе напряжения.



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!