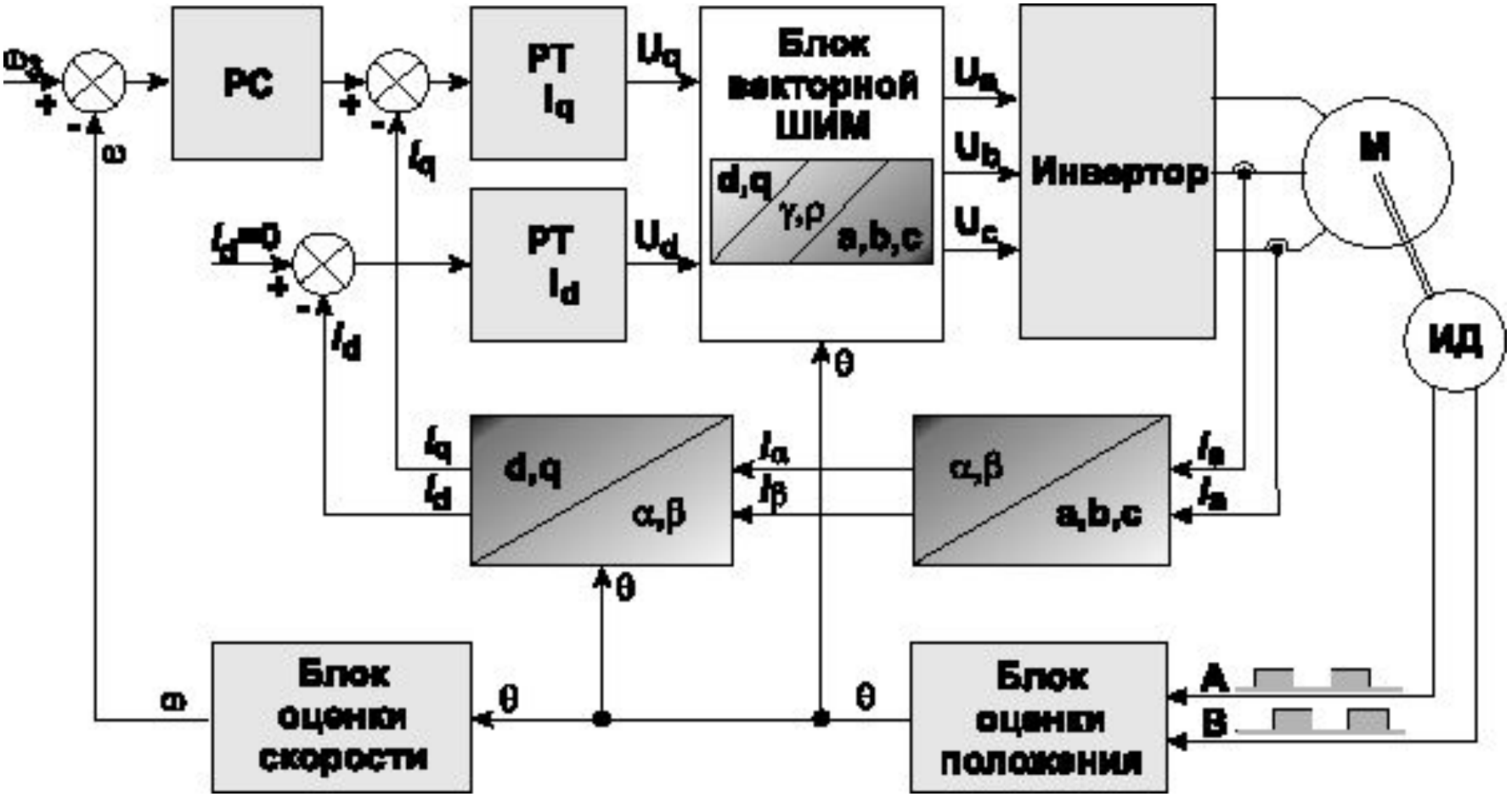
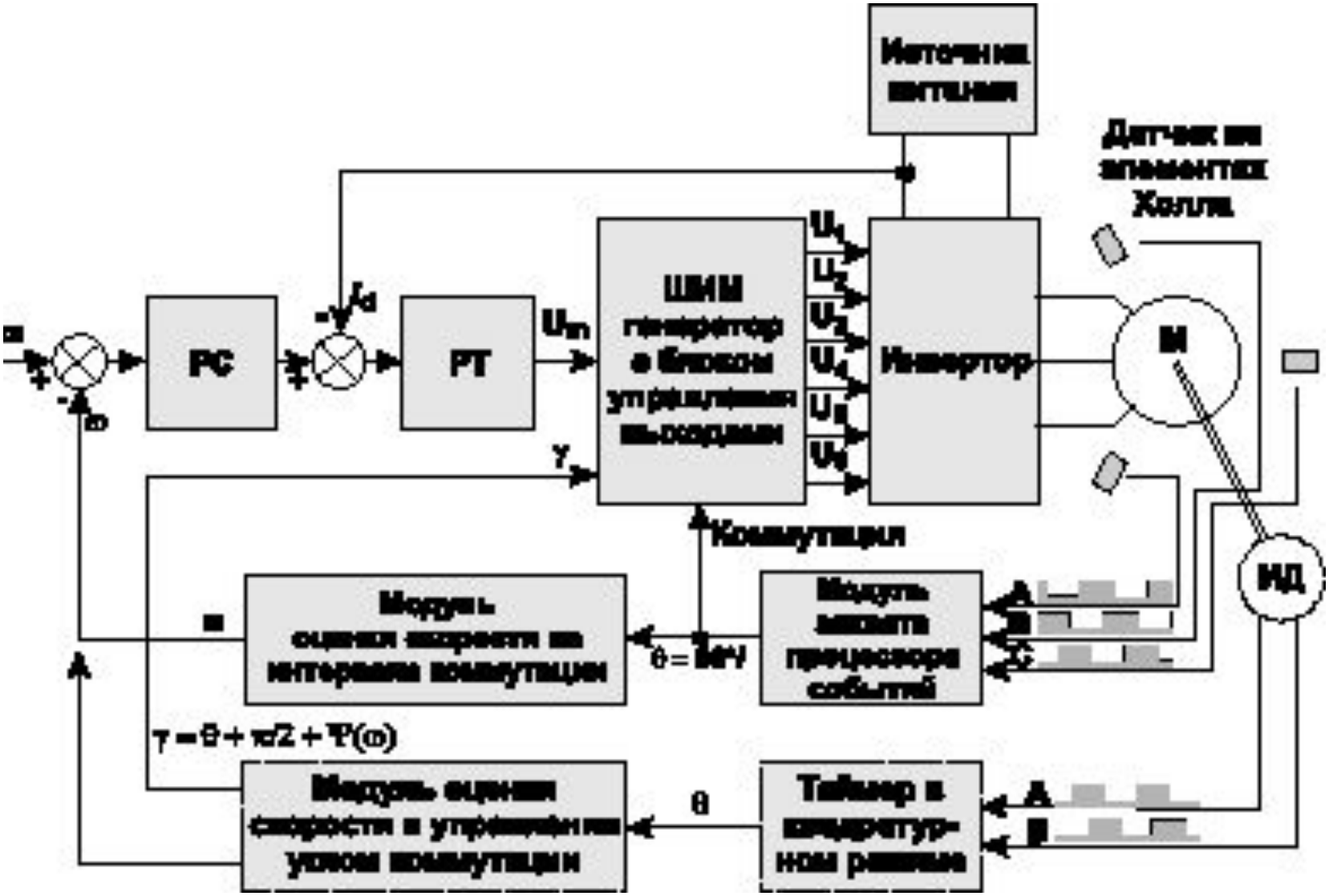
# Микропроцессорные системы управления двигателями переменного тока

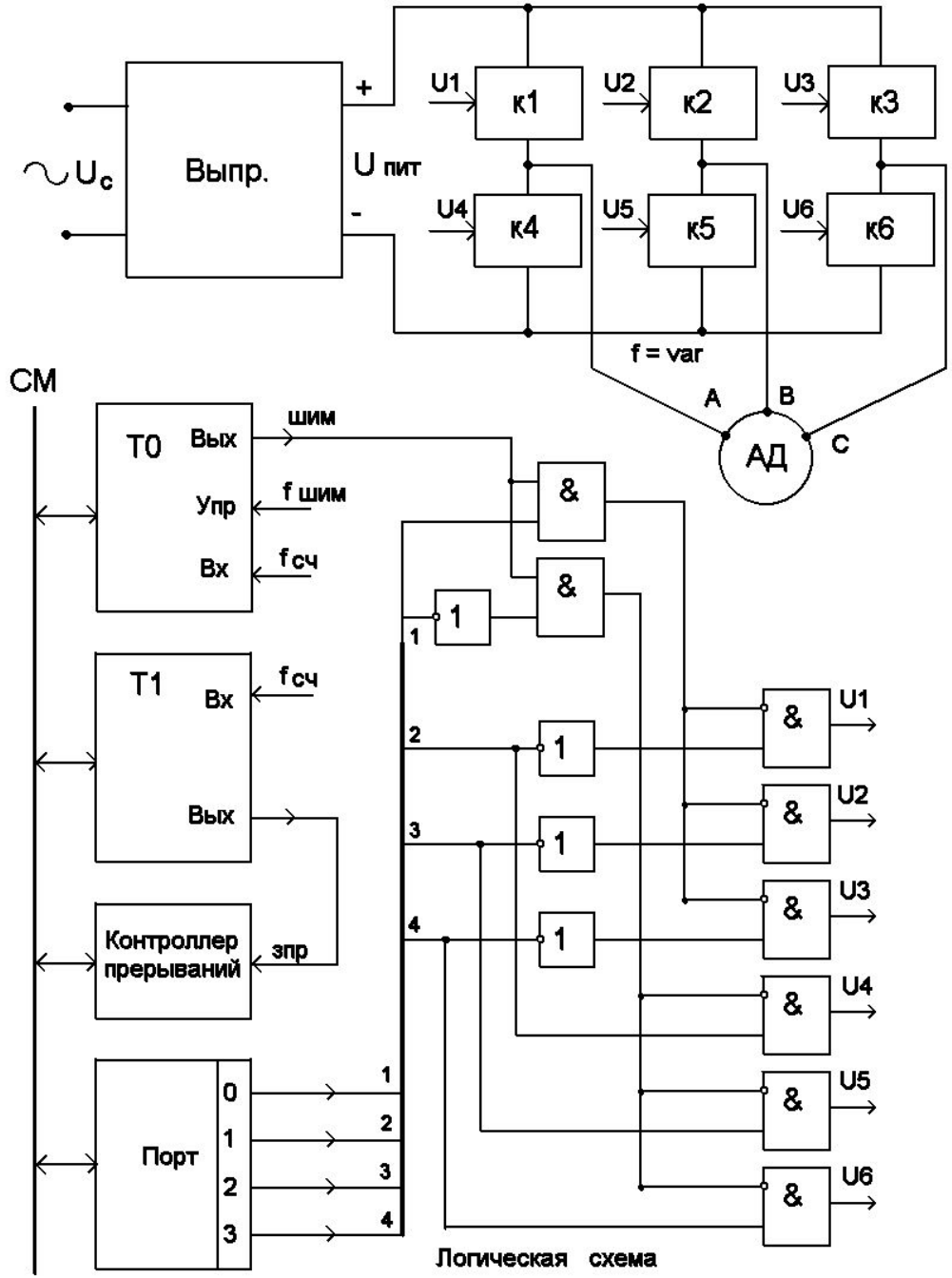
1 Алгоритмы управления ключами инвертора при частотном управлении двигателями переменного тока.

2 Основные тенденции развития встроенных периферийных устройств микроконтроллеров серий *Motor Control* .

3 Примеры контроллеров серий *Motor Control* ведущих фирм.


РС
РТ
Iq
Uq
Блок
векторной
ШИМ
d,q
γ,ρ
a,b,c
Ua
Ub
Uc
Инвертор
М
ИД
РТ
Id
Ud
Id=0
Iq
Id
d,q
α,β
Iα
Iβ
α,β
a,b,c
Ia
Ib
θ
ω
Блок
оценки
скорости
Блок
оценки
положения
A
B

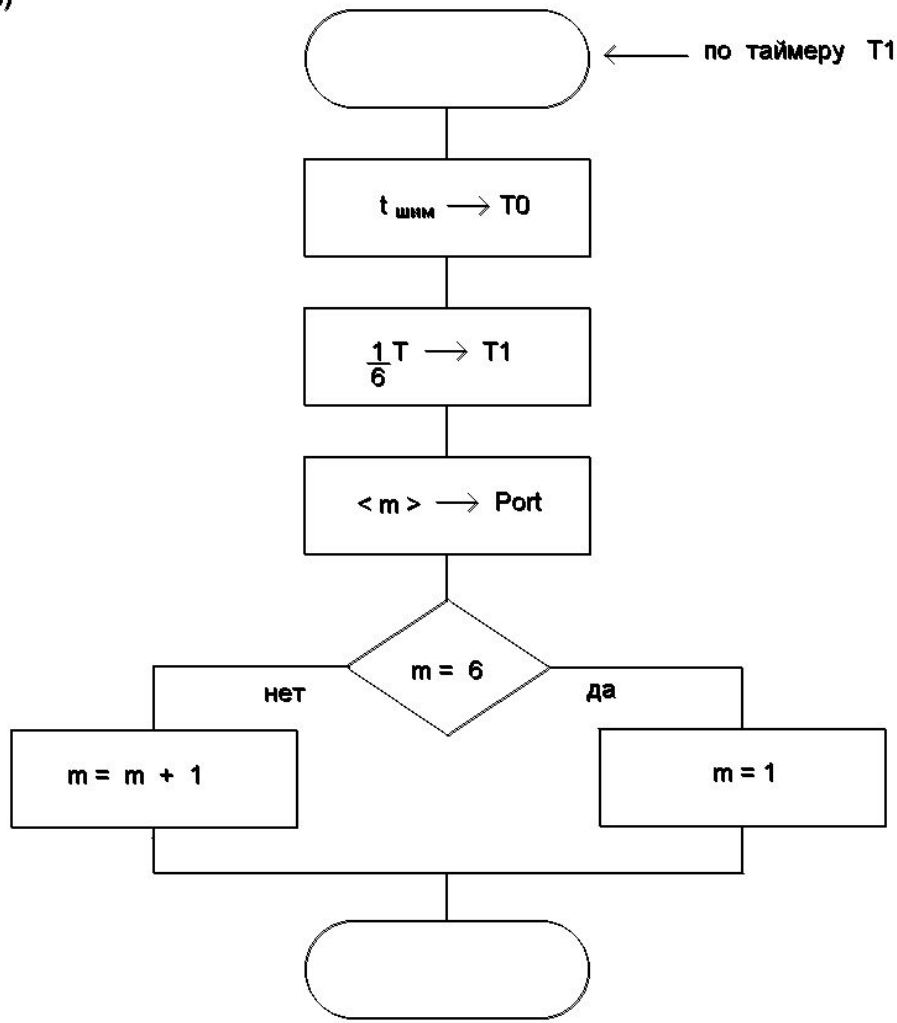

Источник питания
Датчик на элементах Холла
РС
РТ
ШИМ генератор и блоки управления выходами
Инвертор
М
ВД
Коммутации
Модуль оценки скорости на интервале коммутации
Модуль захвата процессора событий
Модуль оценки скорости и управления углом коммутации
Таймер в квадратурном режиме

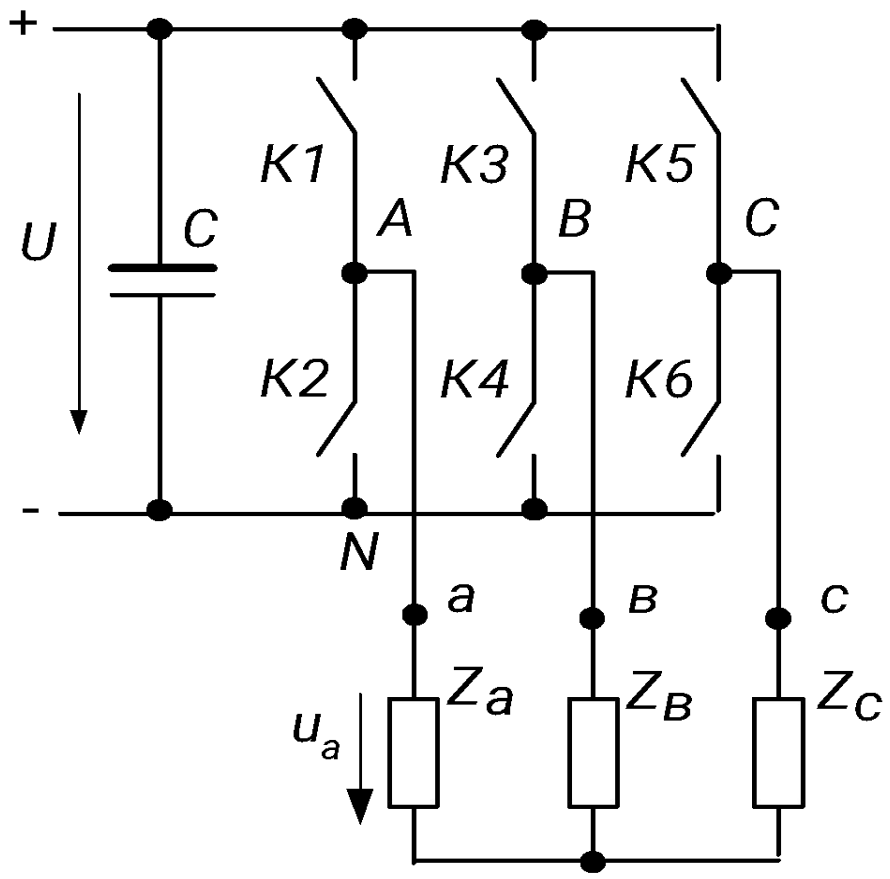

Выпр.
Uс
+
U пит
-
U1
к1
U2
к2
U3
к3
U4
к4
U5
к5
U6
к6
f = var
A
B
C
АД
СМ
Т0
Вых
Упр
Вх
шим
f шим
fсч
Т1
Вх
Вых
fсч
Контроллер прерываний
зпр
Порт
0
1
2
3
1
2
3
4
&
1
U1
U2
U3
U4
U5
U6
Логическая схема

а)

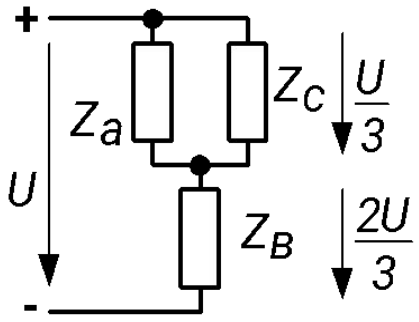
| Port | Фазы / кл. / m | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 3 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| | 5 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 6 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | Верхний / Нижний | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |

б)

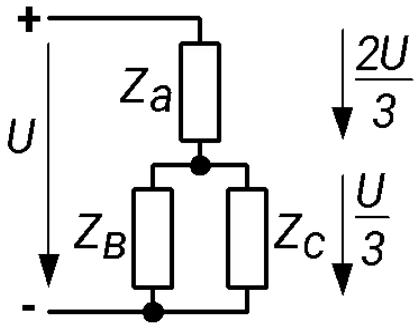



+
U
C
K1
K3
K5
A
B
C
K2
K4
K6
-
N
a
в
c
Za
ZB
ZC
ua

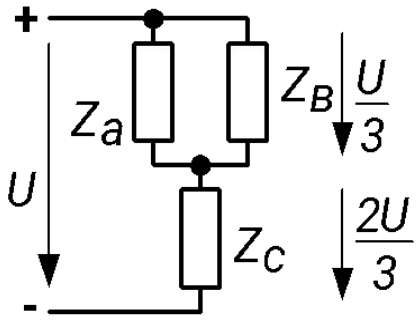
інтервал 6



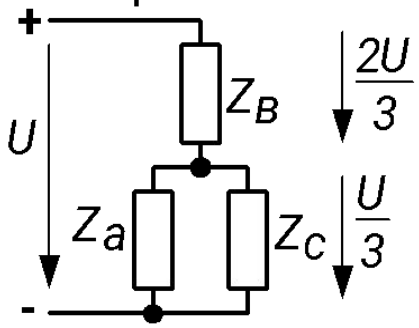

інтервал 1



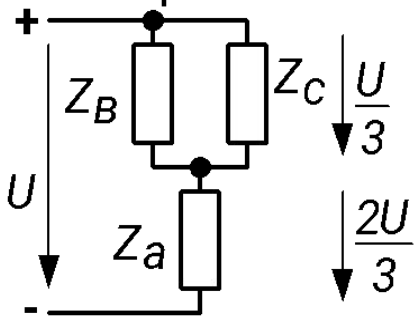

інтервал 2



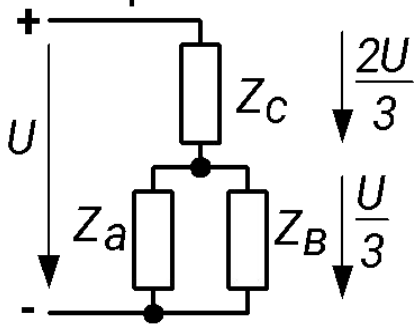

інтервал 3

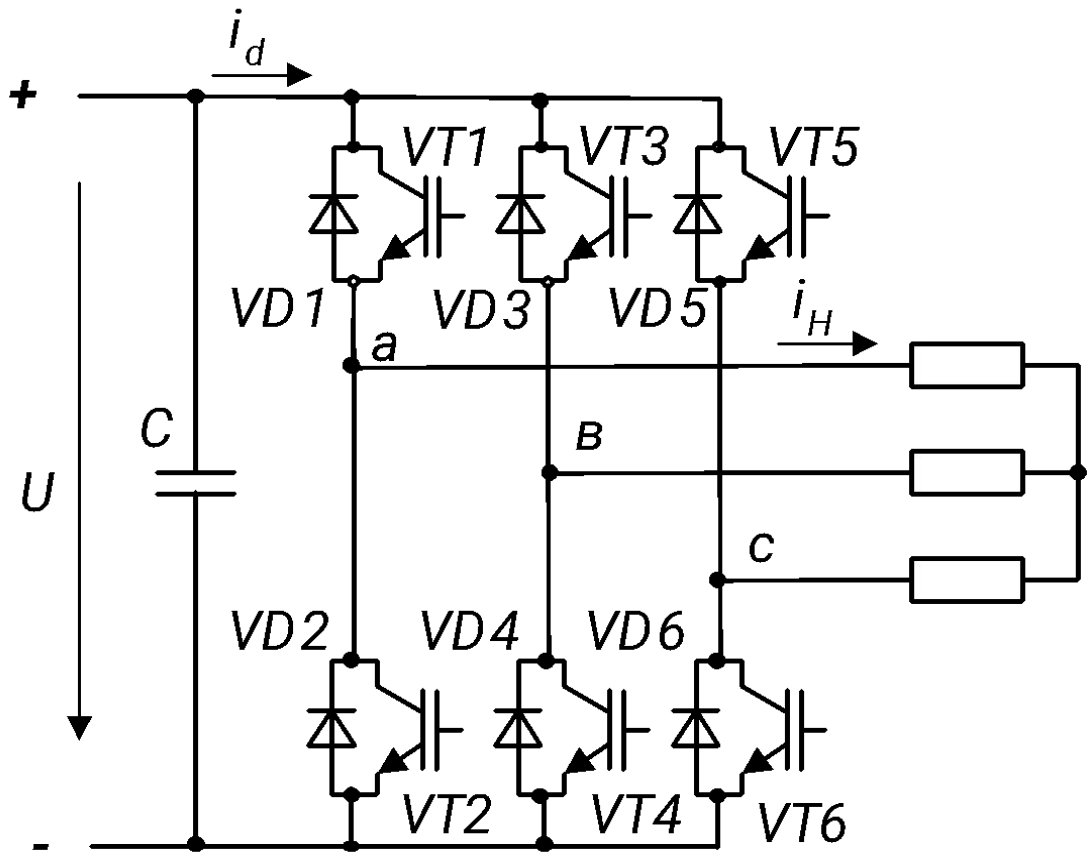


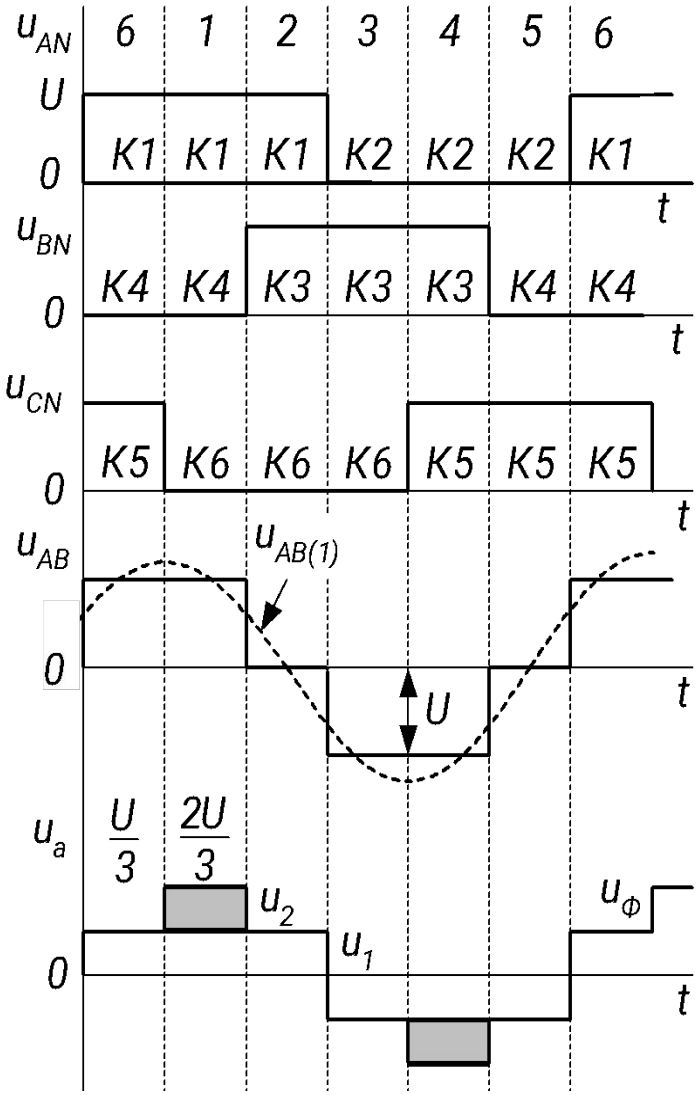

інтервал 4



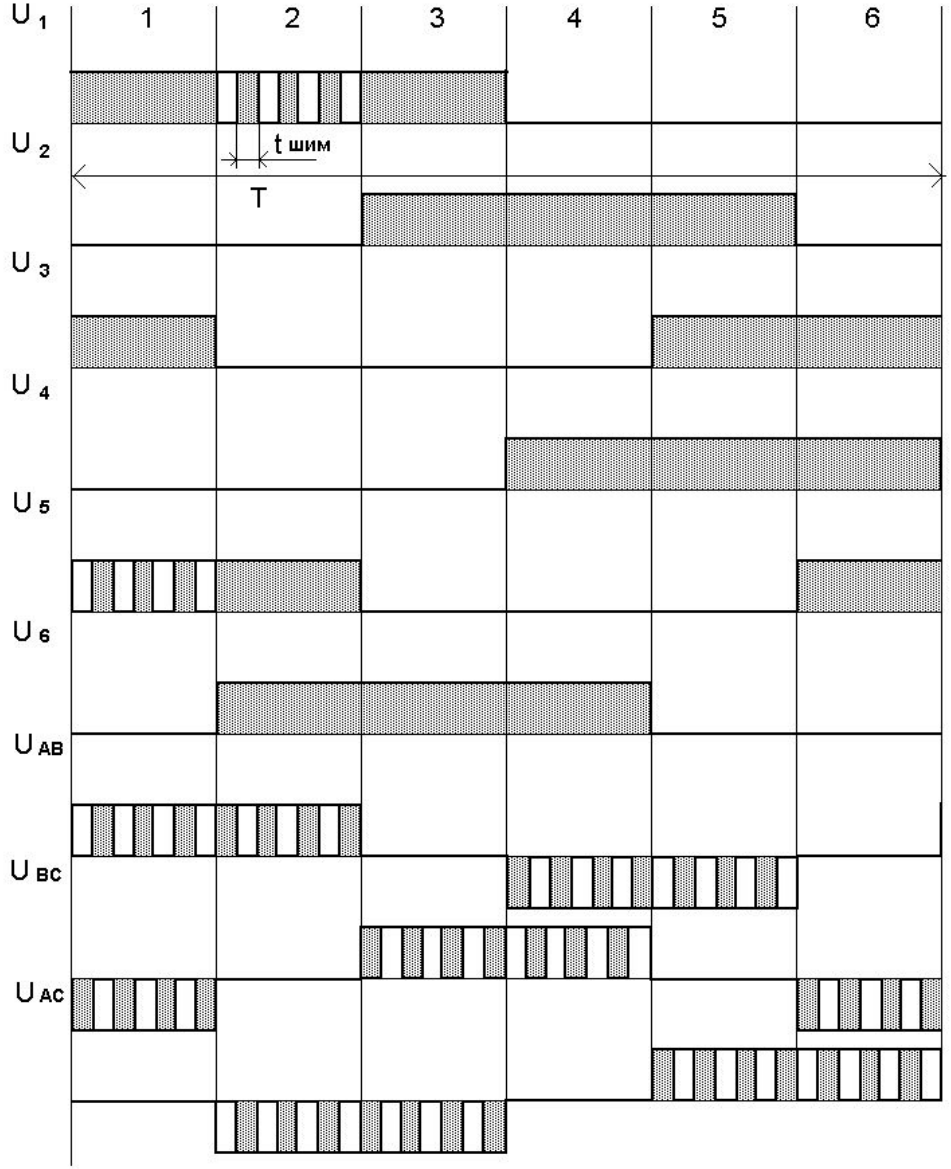

інтервал 5

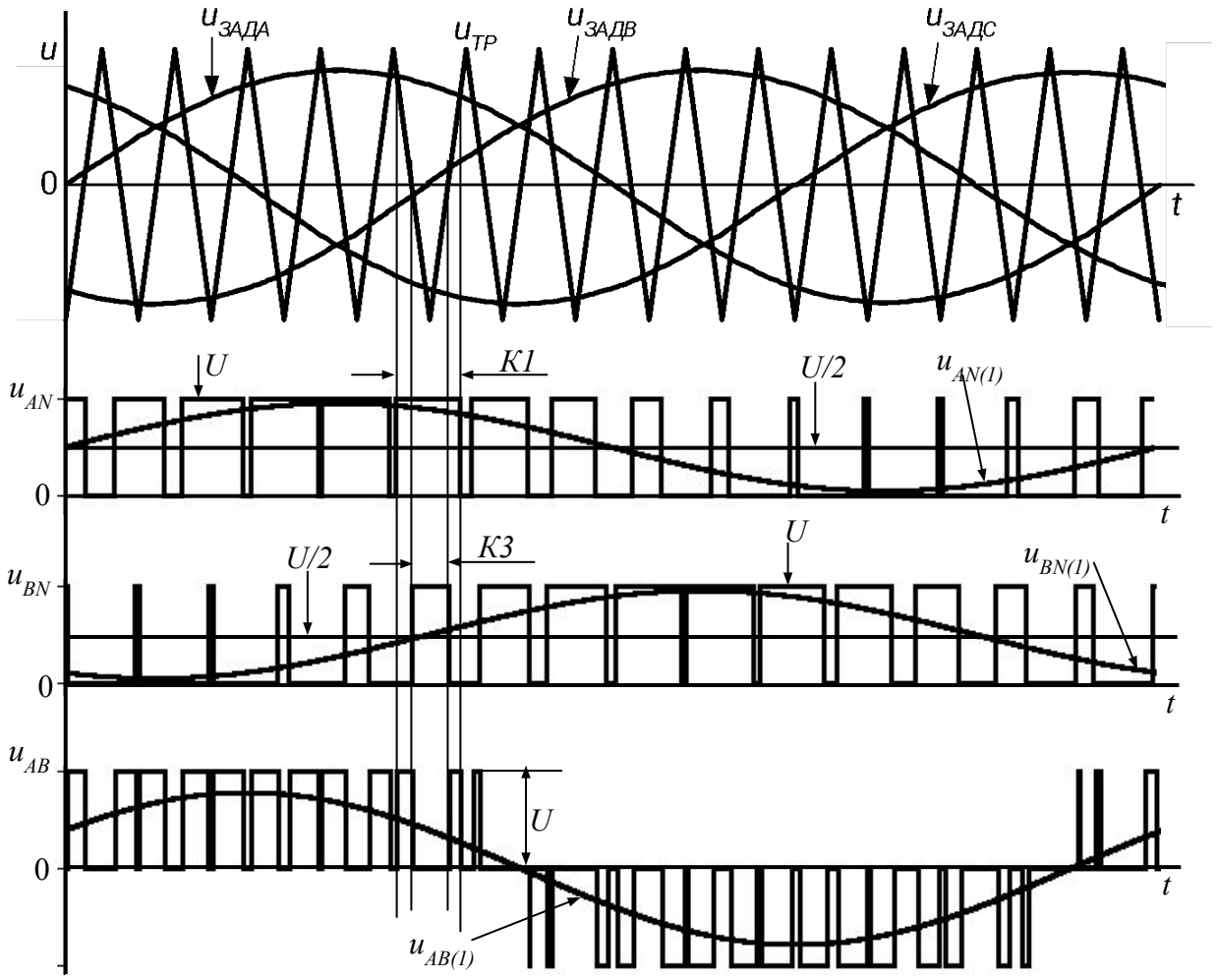


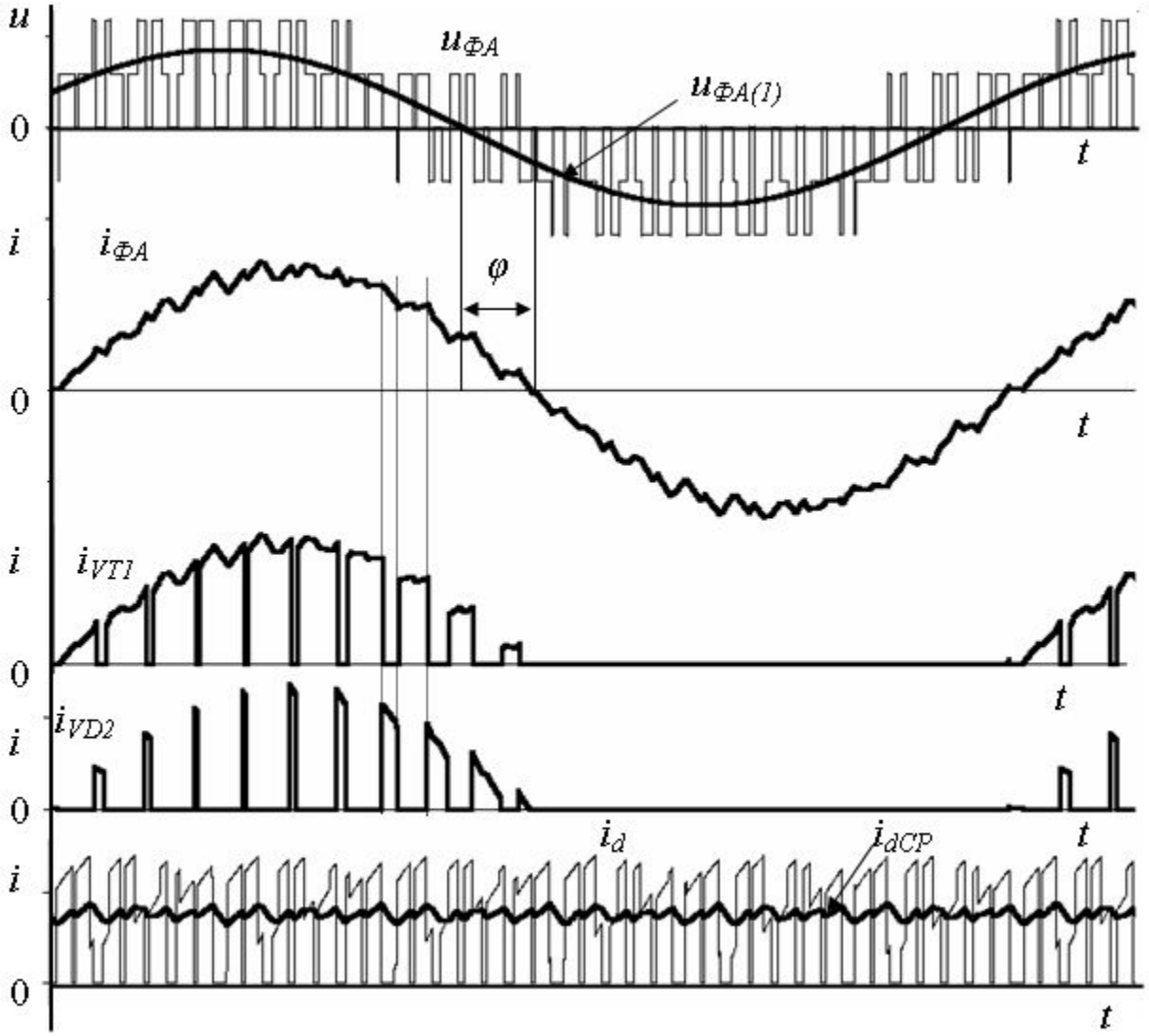

$i_d$
+
VT1
VT3
VT5
VD1
VD3
VD5
$i_H$
a
C
в
U
c
VD2
VD4
VD6
VT2
VT4
VT6
-

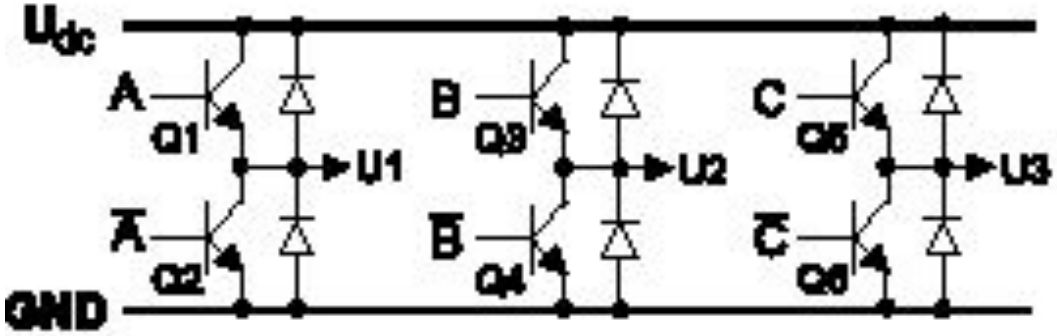

$u_{AN}$
6
1
2
3
4
5
6
U
0
K1
K1
K1
K2
K2
K2
K1
t
$u_{BN}$
K4
K4
K3
K3
K3
K4
K4
0
t
$u_{CN}$
K5
K6
K6
K6
K5
K5
K5
0
t
$u_{AB}$
$u_{AB(1)}$
0
t
U
$u_a$
$\frac{U}{3}$
$\frac{2U}{3}$
$u_2$
$u_1$
$u_\Phi$
0
t

.


U 1
1
2
3
4
5
6
U 2
t шим
T
U 3
U 4
U 5
U 6
U AB
U BC
U AC


u
$u_{ЗАДА}$
$u_{ТР}$
$u_{ЗАДВ}$
$u_{ЗАДС}$
0
t
U
K1
U/2
$u_{AN(1)}$
$u_{AN}$
0
t
U/2
K3
U
$u_{BN(1)}$
$u_{BN}$
0
t
$u_{AB}$
U
0
t
$u_{AB(1)}$

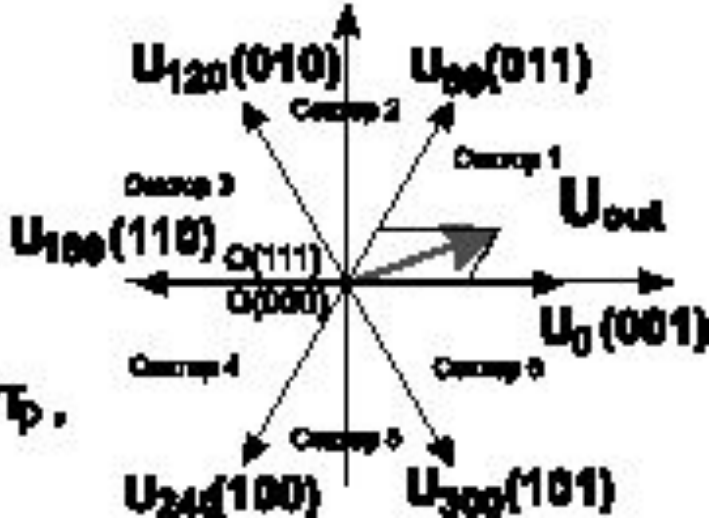

u
$u_{ФА}$
$u_{ФА(1)}$
0
t
i
$i_{ФА}$
φ
0
t
i
$i_{VT1}$
0
t
$i_{VD2}$
i
0
$i_d$
$i_{dCP}$
t
i
0
t




**Базовые вектора**

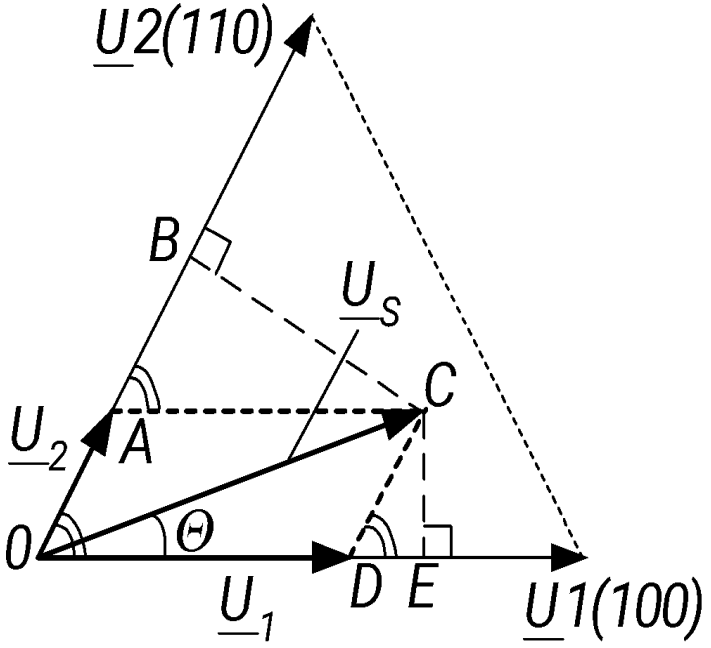
$U_x = U_x (C,B,A)$

x = 0, 60, 120, 180, 240, 300




$U_{out} = [T_1 * U_x + T_2 * U_{x+60} + T_0 * O(000 \text{ или } 111)]/T_p$,

$T_0 = T_p - T_1 - T_2$, где $T_p$ — период ШИМ


U2(110)
B
Us
C
U2
A
0
Θ
U1
D
E
U1(100)

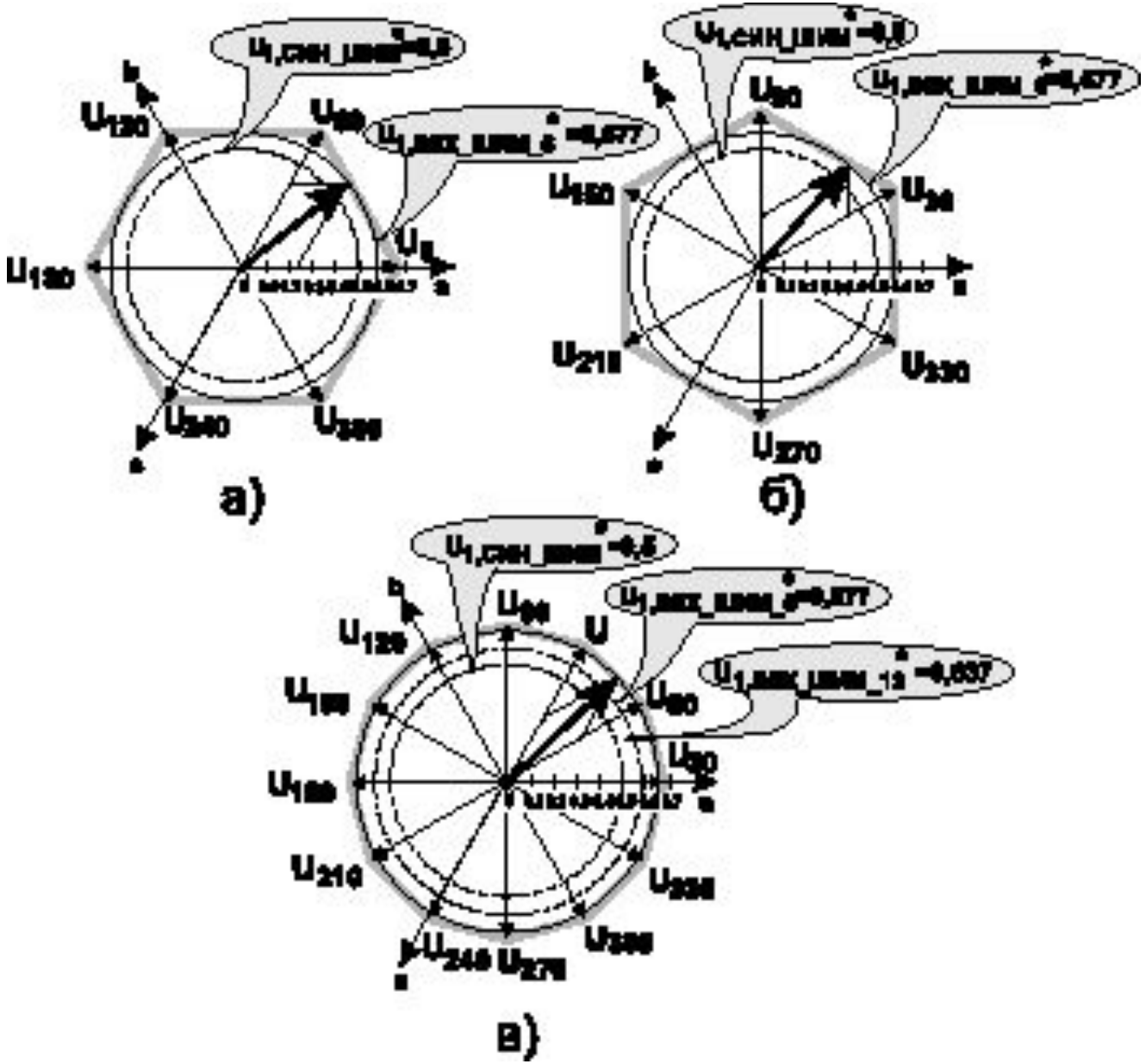
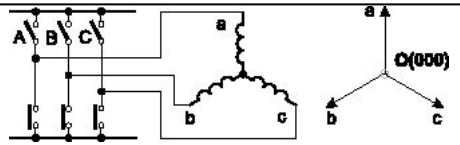
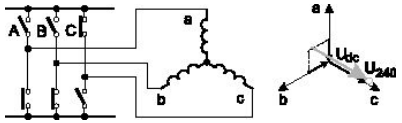
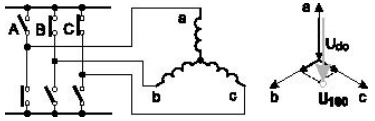
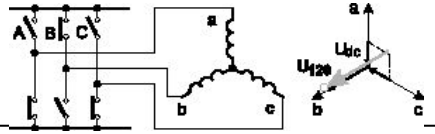
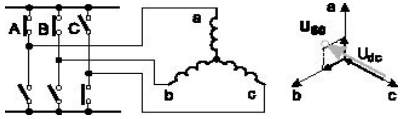
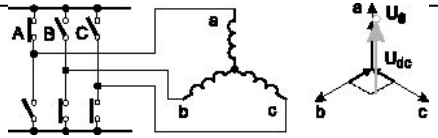
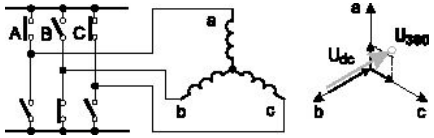
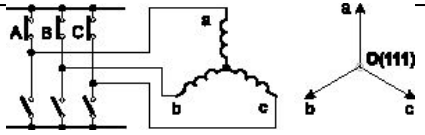
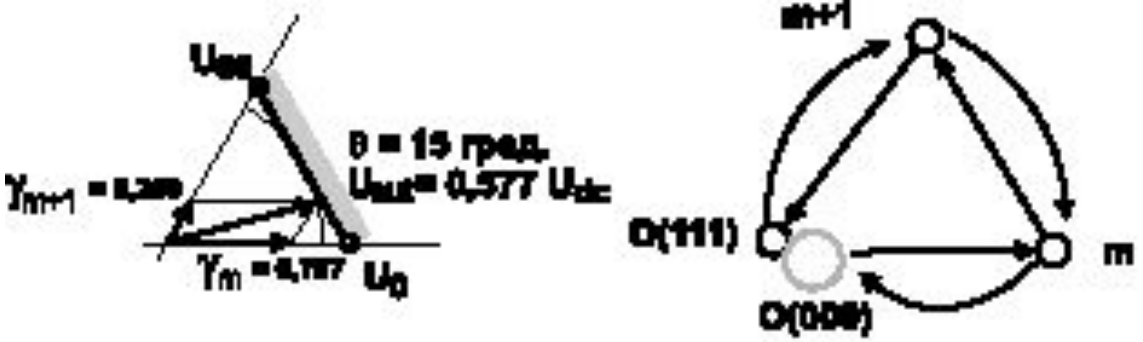

а)
б)
в)

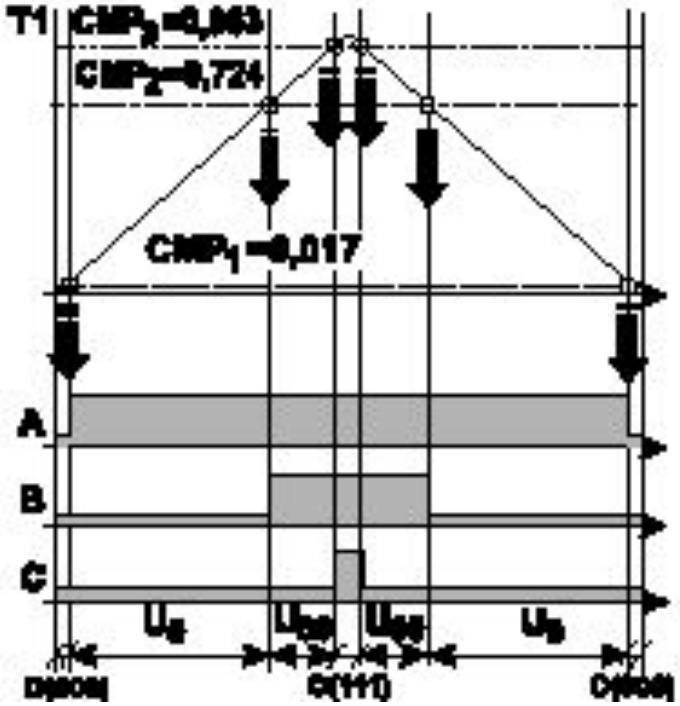
**Таблица Схемы включения и векторные диаграммы для инвентора в режиме ШИМ-модуляции базовых векторов**

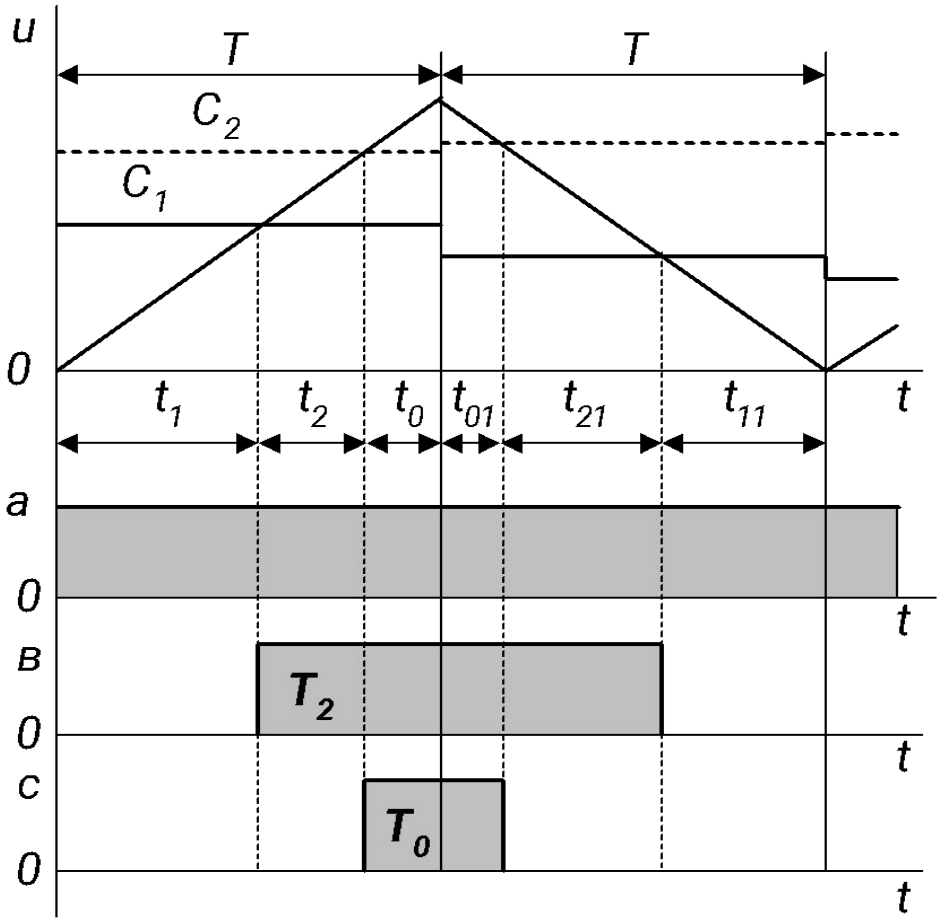
| Базовый вектор | | | | Схема включения и векторная диаграмма | Фазные напряжения ($U_ф/U_{dc}$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Название | Код | | | | | | |
| | C | B | A | | $U_c$ | $U_b$ | $U_a$ |
| O(000) | 0 | 0 | 0 |  | 0 | 0 | 0 |
| $U_0$(001) | 0 | 0 | 1 |  | -(1/3) | -(1/3) | +(2/3) |
| $U_{60}$(011) | 0 | 1 | 1 |  | -(2/3) | +(1/3) | +(1/3) |
| $U_{120}$(010) | 0 | 1 | 0 |  | -(1/3) | +(2/3) | -(1/3) |
| $U_{180}$(110) | 1 | 1 | 0 |  | +(1/3) | +(1/3) | -(2/3) |
| $U_{240}$(100) | 1 | 0 | 0 |  | +(2/3) | -(1/3) | -(1/3) |
| $U_{300}$(101) | 1 | 0 | 1 |  | +(1/3) | -(2/3) | +(1/3) |
| O(111) | 1 | 1 | 1 |  | 0 | 0 | 0 |

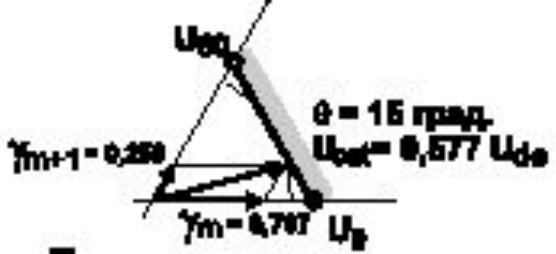



**Тип коммутации**
**O(000), m, m+1, O(111) , m+1, m, O(000)**

$$CMF_1^* = \frac{1-\gamma_m-\gamma_{m+1}}{2};\quad CMF_2^* = \frac{1+\gamma_m-\gamma_{m+1}}{2};\quad CMF_3^* = \frac{1+\gamma_m+\gamma_{m+1}}{2}$$



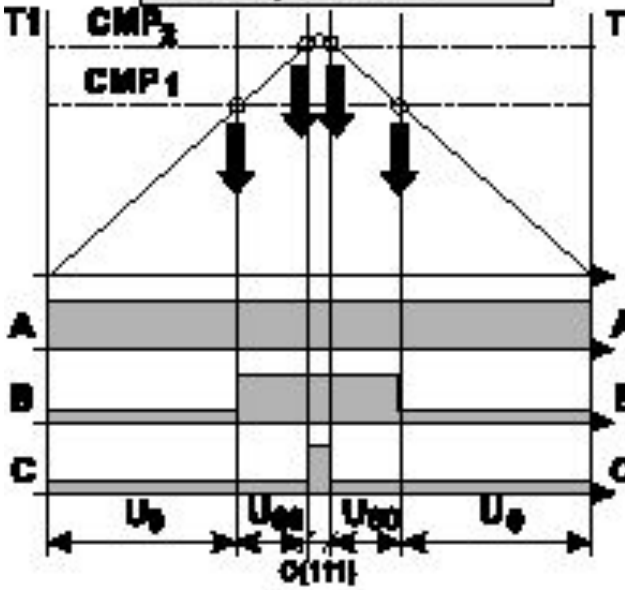

u
T
T
C2
C1
0
t1
t2
t0
t01
t21
t11
t
a
0
t
в
T2
0
t
c
T0
0
t

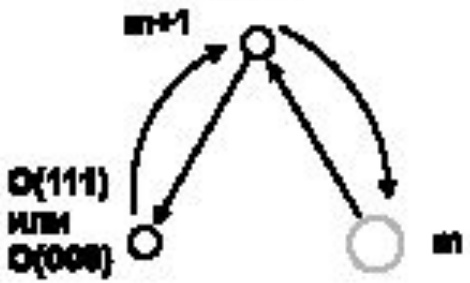



**Тип коммутации:**

m, m+1, O(111) , m+1, m
m, m+1, O(000), m+1, m

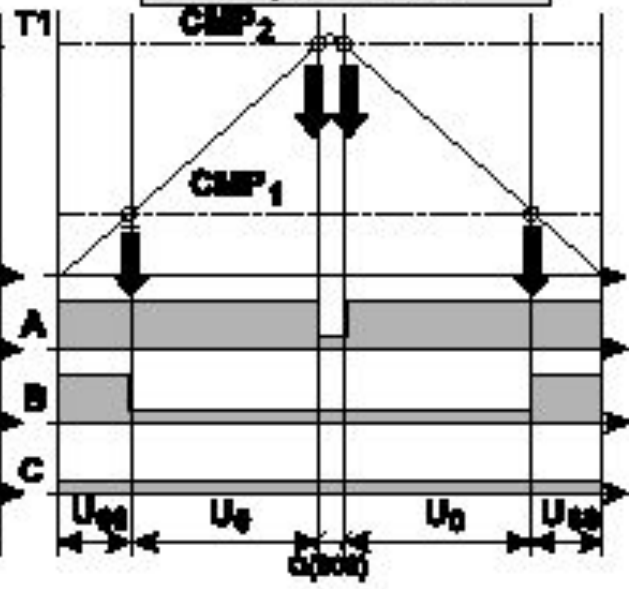
$CMP_2^* = \gamma_m + \gamma_{m+1} = 0,966$
$CMP_1^* = \gamma_m = 0,707$

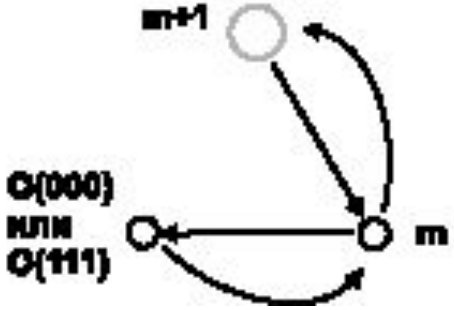


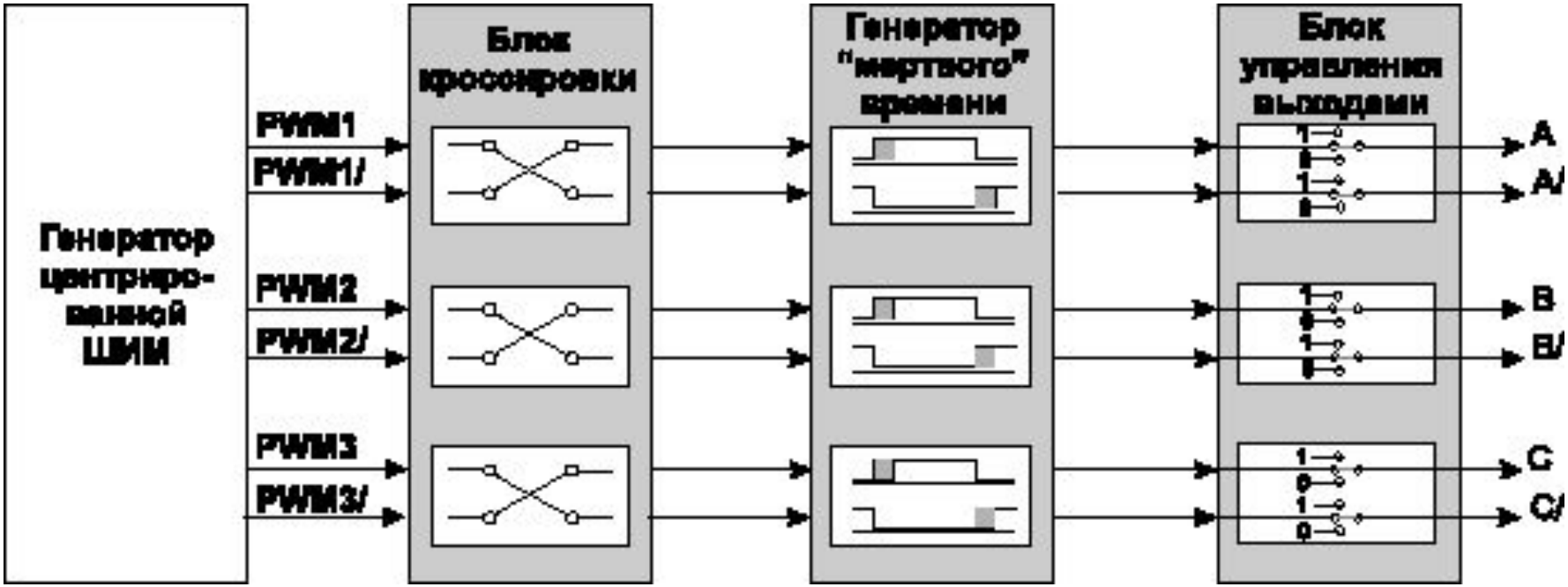



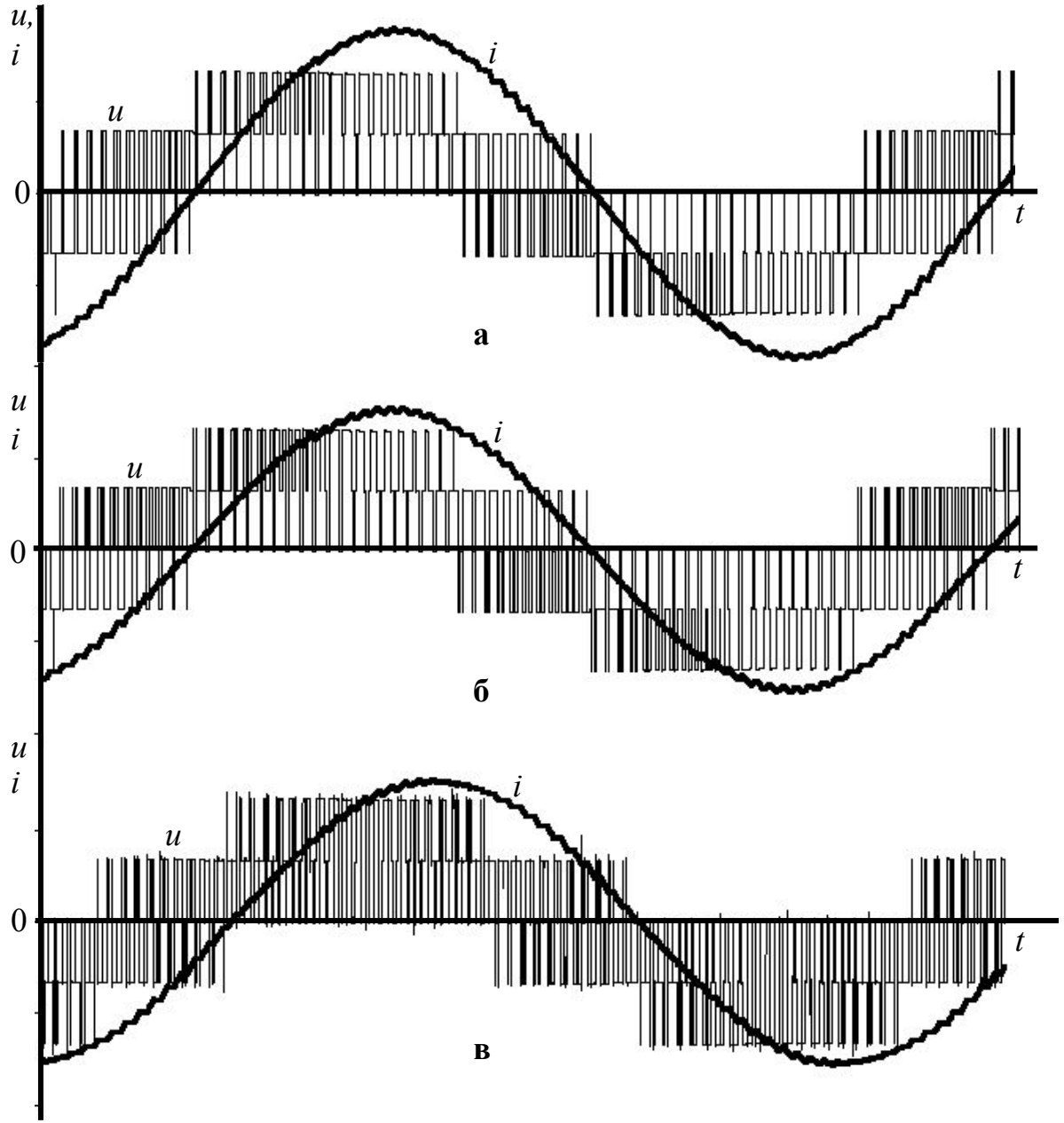

m+1, m, O(000), m, m+1
m+1, m, O(111), m, m+1

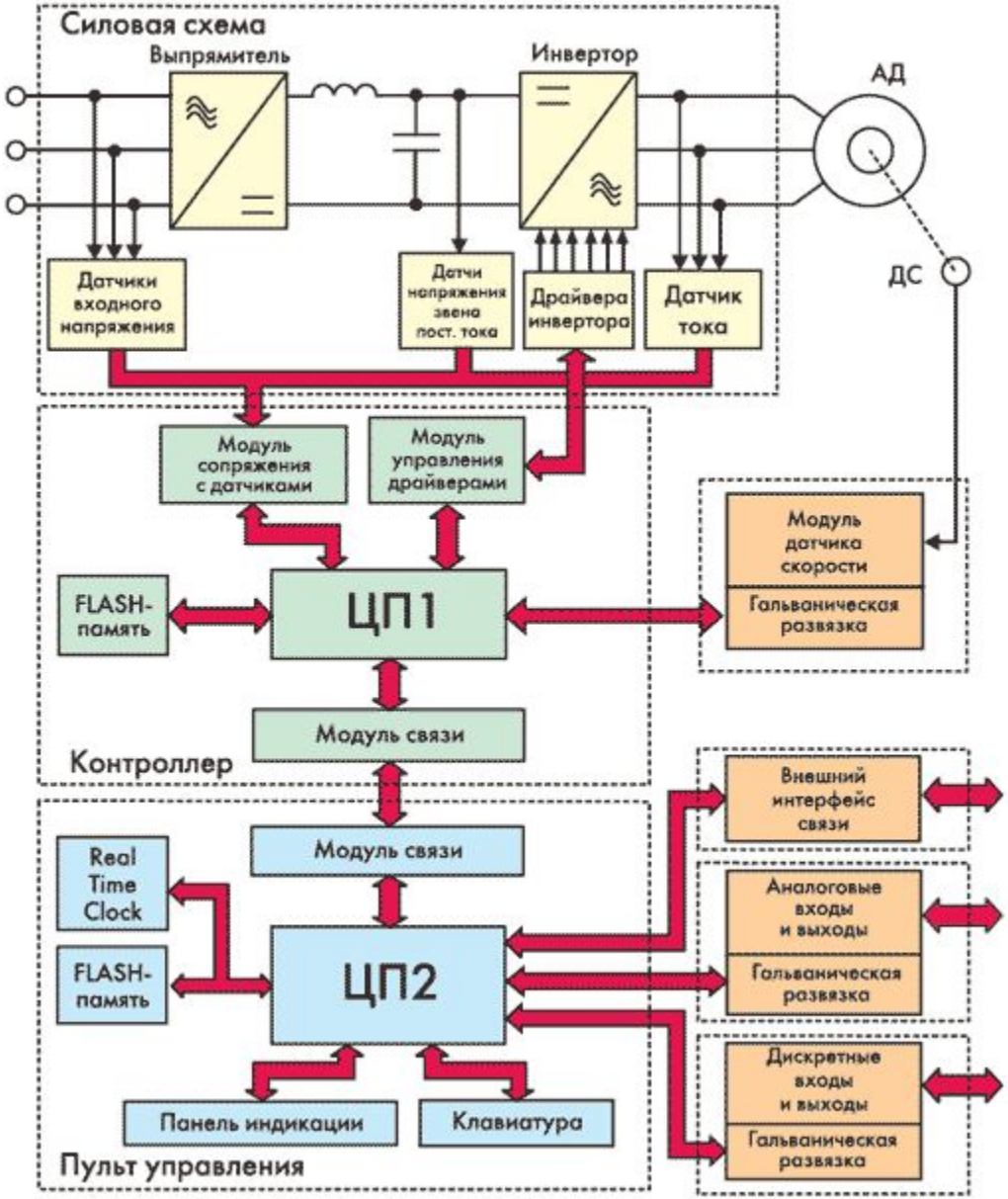
$CMP_2^* = \gamma_m + \gamma_{m+1} = 0,966$
$CMP_1^* = \gamma_{m+1} = 0,259$




Генератор центрирован-ной ШИМ
PWM1
PWM1/
PWM2
PWM2/
PWM3
PWM3/
Блок кроссировки
Генератор "мертвого" времени
Блок управления выходами
A
A/
B
B/
C
C/

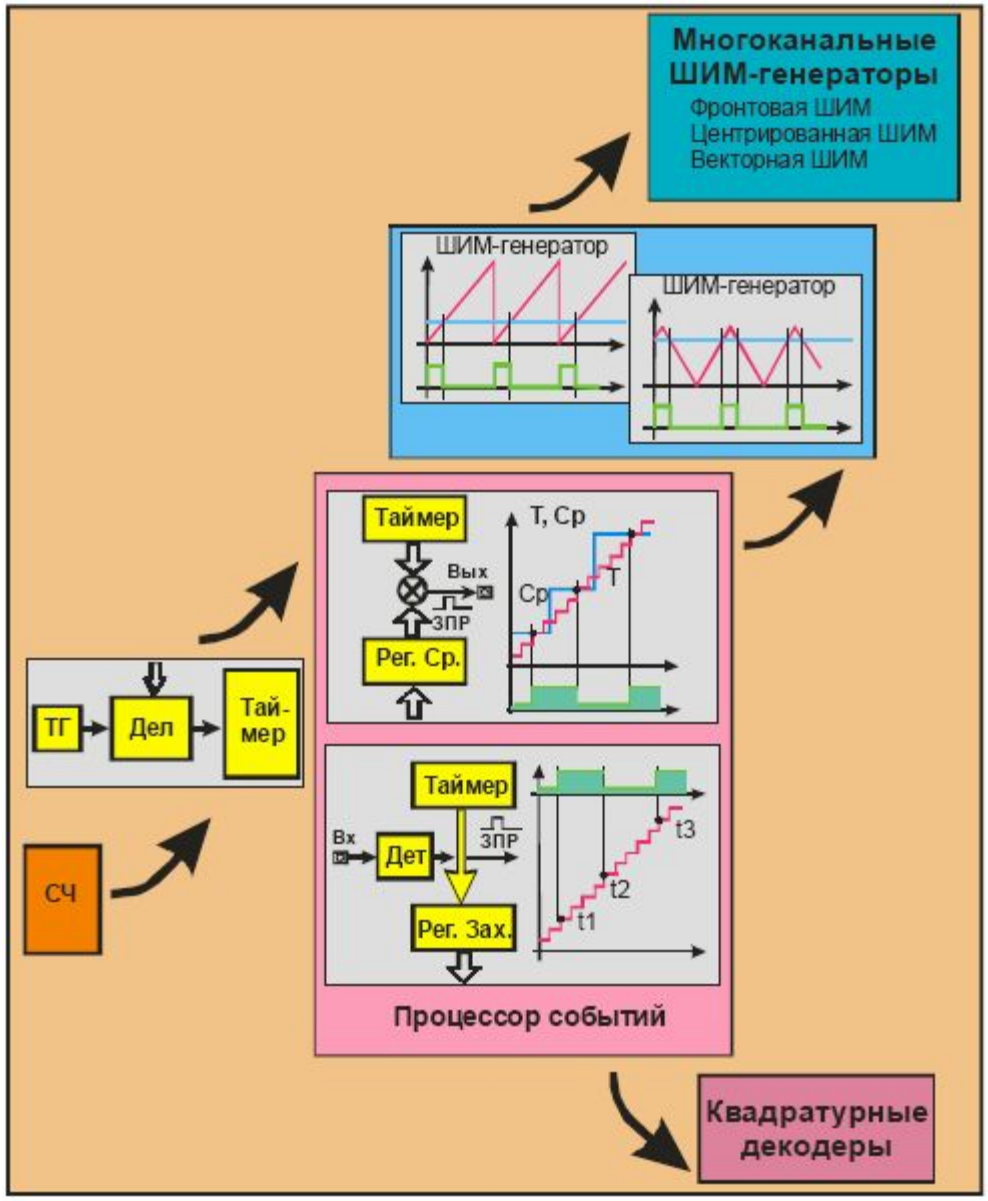

u,
i
u
i
0
t
а
u
i
u
i
0
t
б
u
i
u
i
0
t
в


Силовая схема
Выпрямитель
Инвертор
АД
ДС
Датчики входного напряжения
Датчи напряжения звена пост. тока
Драйвера инвертора
Датчик тока
Модуль сопряжения с датчиками
Модуль управления драйверами
Модуль датчика скорости
Гальваническая развязка
FLASH-память
ЦП1
Модуль связи
Контроллер
Внешний интерфейс связи
Модуль связи
Real Time Clock
FLASH-память
ЦП2
Аналоговые входы и выходы
Гальваническая развязка
Дискретные входы и выходы
Гальваническая развязка
Панель индикации
Клавиатура
Пульт управления

| | |
|---|---|
| Метод формирования выходного напряжения | – Синусоидальная ШИМ;<br>– метод пространственной модуляции базовых векторов (Space Vector Modulation). |
| | Частота ШИМ настраиваемая, 8...16 кГц для мощностей от 0,75 до 30 кВт и 4...8 кГц для мощностей выше 37 кВт.<br>Для снижения уровня акустического шума используется метод «мягкой» ШИМ. |
| Метод управления двигателем | Скалярное управление:<br>– классическое скалярное управление по заданной характеристике U/f;<br>– скалярное управление с компенсацией падения напряжения на статоре (IR-компенсация);<br>– скалярное управление с компенсацией скольжения. |
| | Векторное управление:<br>– бездатчиковое векторное управление скоростью;<br>– бездатчиковое векторное управление моментом;<br>– векторное управление скоростью с датчиком обратной связи по скорости;<br>– векторное управление моментом с датчиком обратной связи по скорости. |
| Методы торможения двигателя | – Постоянным током;<br>– динамическое торможение с использованием встроенного или внешнего тормозного резистора. |

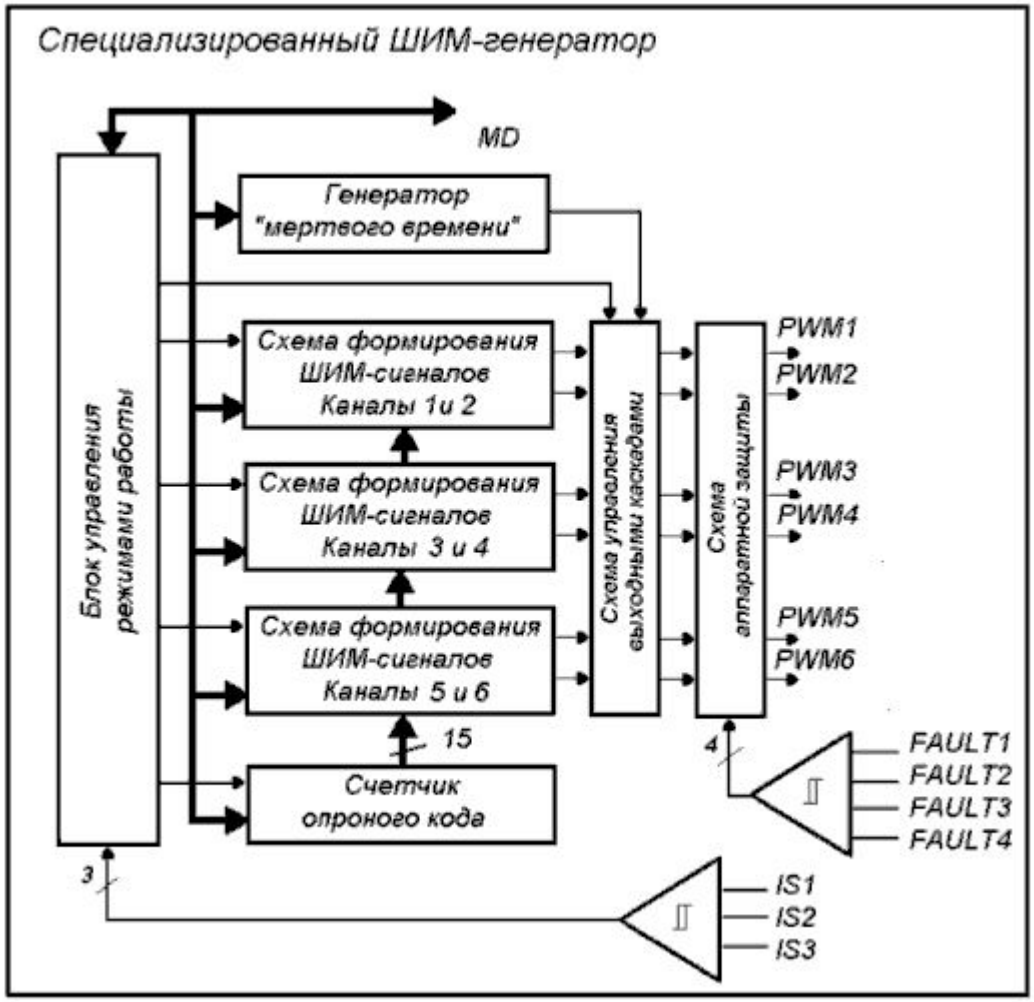
**Основные задачи, решаемые программным обеспечением преобразователей частоты**

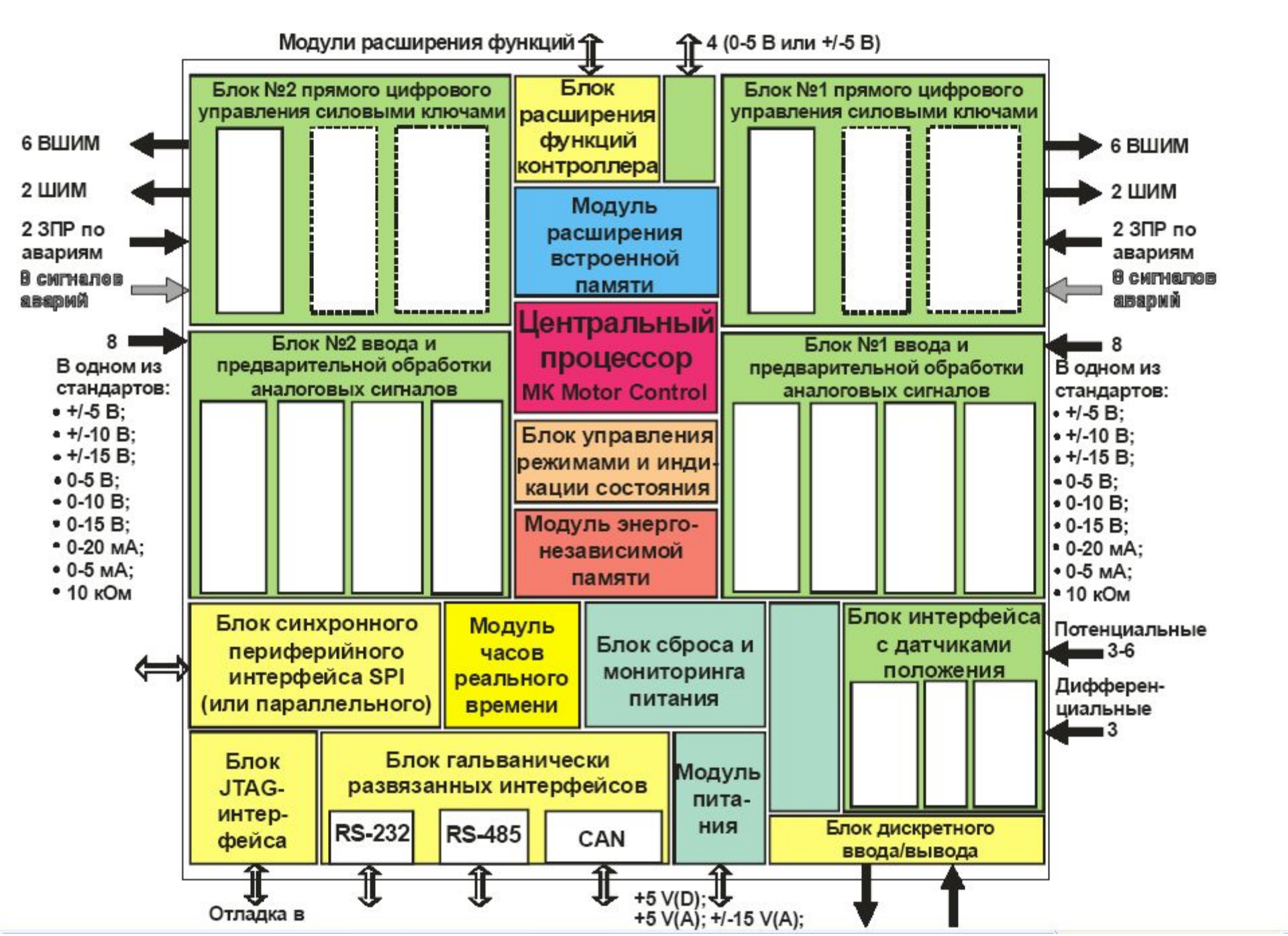
- 1. Реализация различных методов управления электродвигателем и методов формирования выходного напряжения.
- 2. Управление входным выпрямителем
- 3. Прием и обработка информации с датчиков.
- 4. Взаимодействие с периферийными модулями.
- 5. Взаимодействие с системой автоматизации верхнего уровня.
- 6. Обработка внешних сигналов и выдача управляющих воздействий на внешнюю аппаратуру в случае управления преобразователем частоты через дискретные или аналоговые входы.
- 7. Обеспечение интерфейса с пользователем.
- 8. Диагностика аппаратуры и самодиагностика.
- 9. Реализация защитных функций.
- 10. Сохранение информации о режимах, длительности работы, периодичности включения преобразователей частоты; подсчет показателей эффективности за определенный период; ведение журнала произошедших сбоев и аварий.
- 11. Реализация дополнительных функций.


Многоканальные ШИМ-генераторы
Фронтовая ШИМ
Центрированная ШИМ
Векторная ШИМ
ШИМ-генератор
ШИМ-генератор
Таймер
Вых
ЗПР
Рег. Ср.
T, Ср
Ср
T
ТГ
Дел
Тай-мер
СЧ
Таймер
Вх
Дет
ЗПР
Рег. Зах.
t1
t2
t3
Процессор событий
Квадратурные декодеры

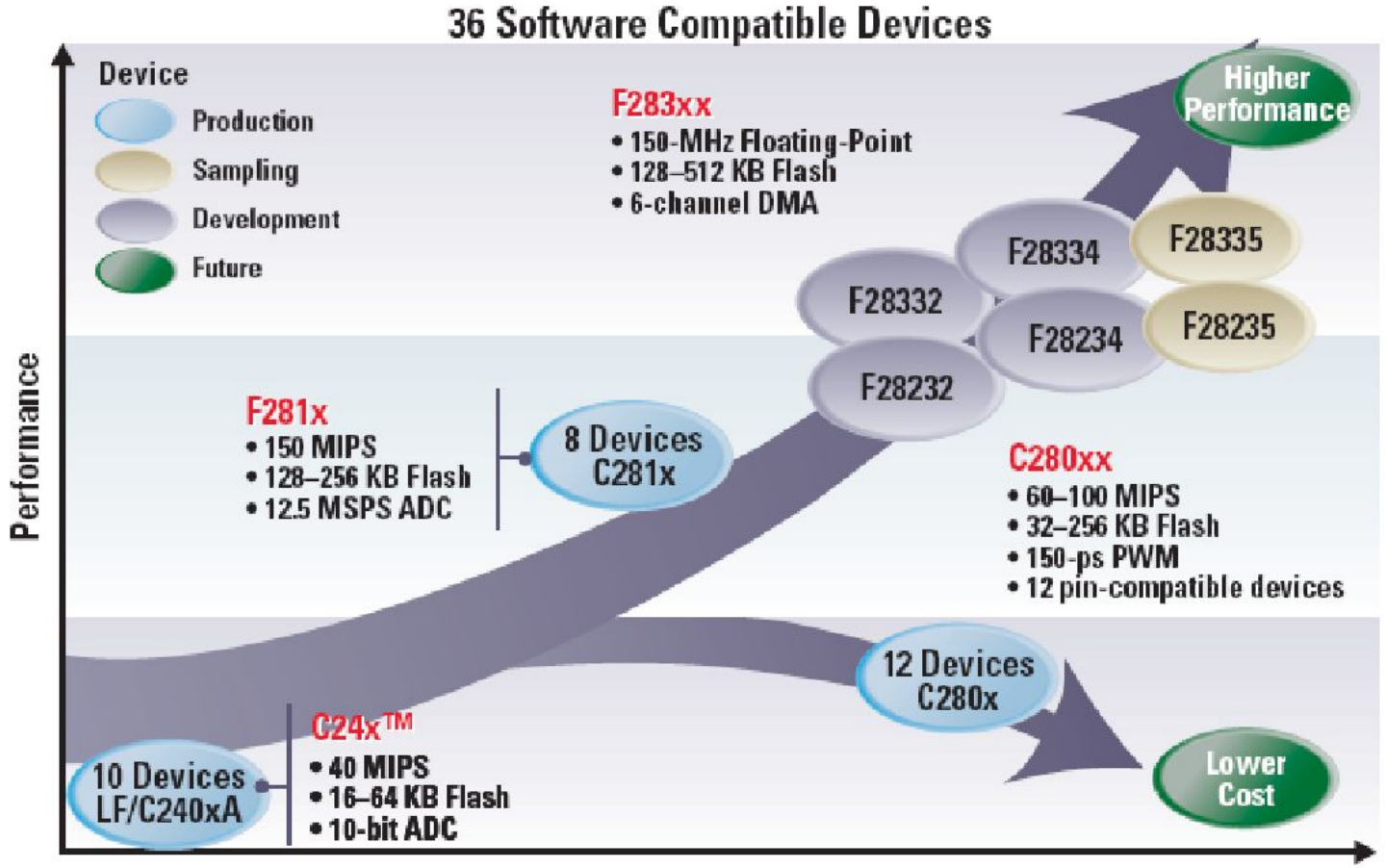
# Основные тенденции развития встроенных периферийных устройств микроконтроллеров.

- 1. Переход от обычных счетчиков к наборам универсальных счетчиков/таймеров со
- встроенными каналами сравнения/захвата и далее к *многоканальным процессорам*
- *событий*.
- 2. Прецизионное формирование многоканальных последовательностей
- управляющих импульсов (в том числе для управления силовыми ключами в режиме
- ШИМ) – *функция высокоскоростного вывода* на часатотах до 20-50 кГц.
- 3. Прецизионная временная обработка входных многоканальных последовательностей импульсов для сопряжения с широким классом датчиков обратных связей– *функция высокоскоростноговвода* на часатотах до 100 кГц и выше.
- 4. Создание специализированных периферийных устройств типа *«квадратурных*
- *декодеров - функция идентификации положения и скорости*;
- 5. Создание *унифицированных многоканальных ШИМ – функция прямого*
- *управления силовыми ключами*.
- 6. Интеграция процессора событий и многоканального ШИМ-генератара в одном
- универсальном устройстве – менеджере событий;
- 7. Создание микроконтроллеров со сдвоенными менеджерами событий для прямого
- цифрового управления приводами по системе: «Активный выпрямитель-Инвертор-
- Двигатель» и «Преобразователь постоянного напряжения в постоянное – Инвертор –
- Двигатель», а также для управления двухдвигательными приводами.
- 8. Значительное повышение быстродействия аналого-цифровых преобразователей
- (время преобразования до 100 нс на канал).
- Поддержка функций прямого токового управления и прямого управления моментом.


Специализированный ШИМ-генератор
MD
Генератор "мертвого времени"
Блок управления режимами работы
Схема формирования ШИМ-сигналов Каналы 1и 2
Схема формирования ШИМ-сигналов Каналы 3 и 4
Схема формирования ШИМ-сигналов Каналы 5 и 6
Счетчик опроного кода
15
3
Схема управления выходными каскадами
Схема аппаратной защиты
4
PWM1
PWM2
PWM3
PWM4
PWM5
PWM6
FAULT1
FAULT2
FAULT3
FAULT4
IS1
IS2
IS3

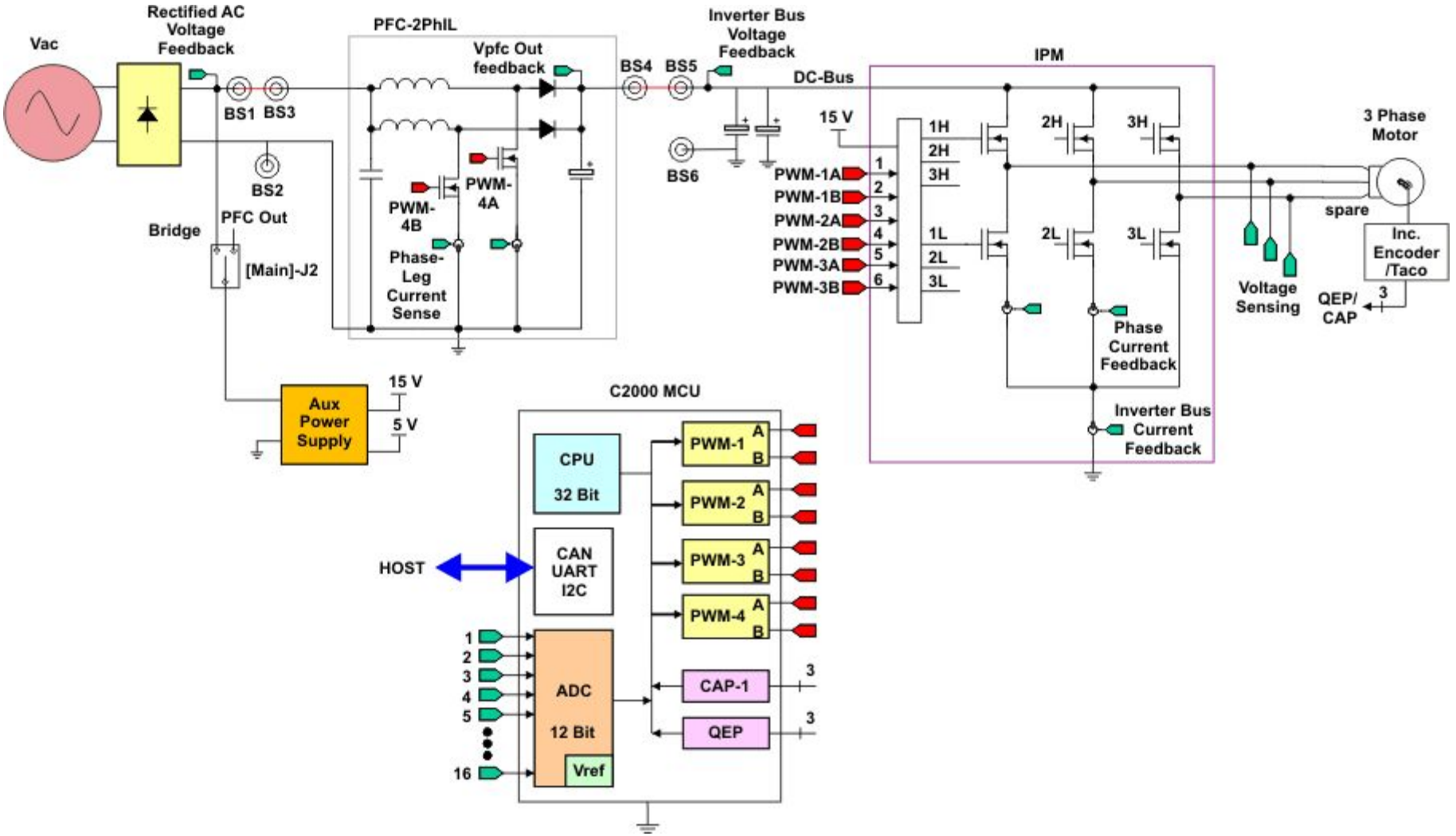

Модули расширения функций
4 (0-5 В или +/-5 В)
Блок №2 прямого цифрового управления силовыми ключами
Блок расширения функций контроллера
Блок №1 прямого цифрового управления силовыми ключами
6 ВШИМ
2 ШИМ
2 ЗПР по авариям
8 сигналов аварий
Модуль расширения встроенной памяти
Центральный процессор
МК Motor Control
8
В одном из стандартов:
• +/-5 В;
• +/-10 В;
• +/-15 В;
• 0-5 В;
• 0-10 В;
• 0-15 В;
• 0-20 мА;
• 0-5 мА;
• 10 кОм
Блок №2 ввода и предварительной обработки аналоговых сигналов
Блок управления режимами и индикации состояния
Модуль энерго-независимой памяти
Блок №1 ввода и предварительной обработки аналоговых сигналов
Блок синхронного периферийного интерфейса SPI (или параллельного)
Модуль часов реального времени
Блок сброса и мониторинга питания
Блок интерфейса с датчиками положения
Потенциальные 3-6
Дифферен-циальные 3
Блок JTAG-интер-фейса
Блок гальванически развязанных интерфейсов
RS-232
RS-485
CAN
Модуль пита-ния
Блок дискретного ввода/вывода
Отладка в
+5 V(D);
+5 V(A); +/-15 V(A);

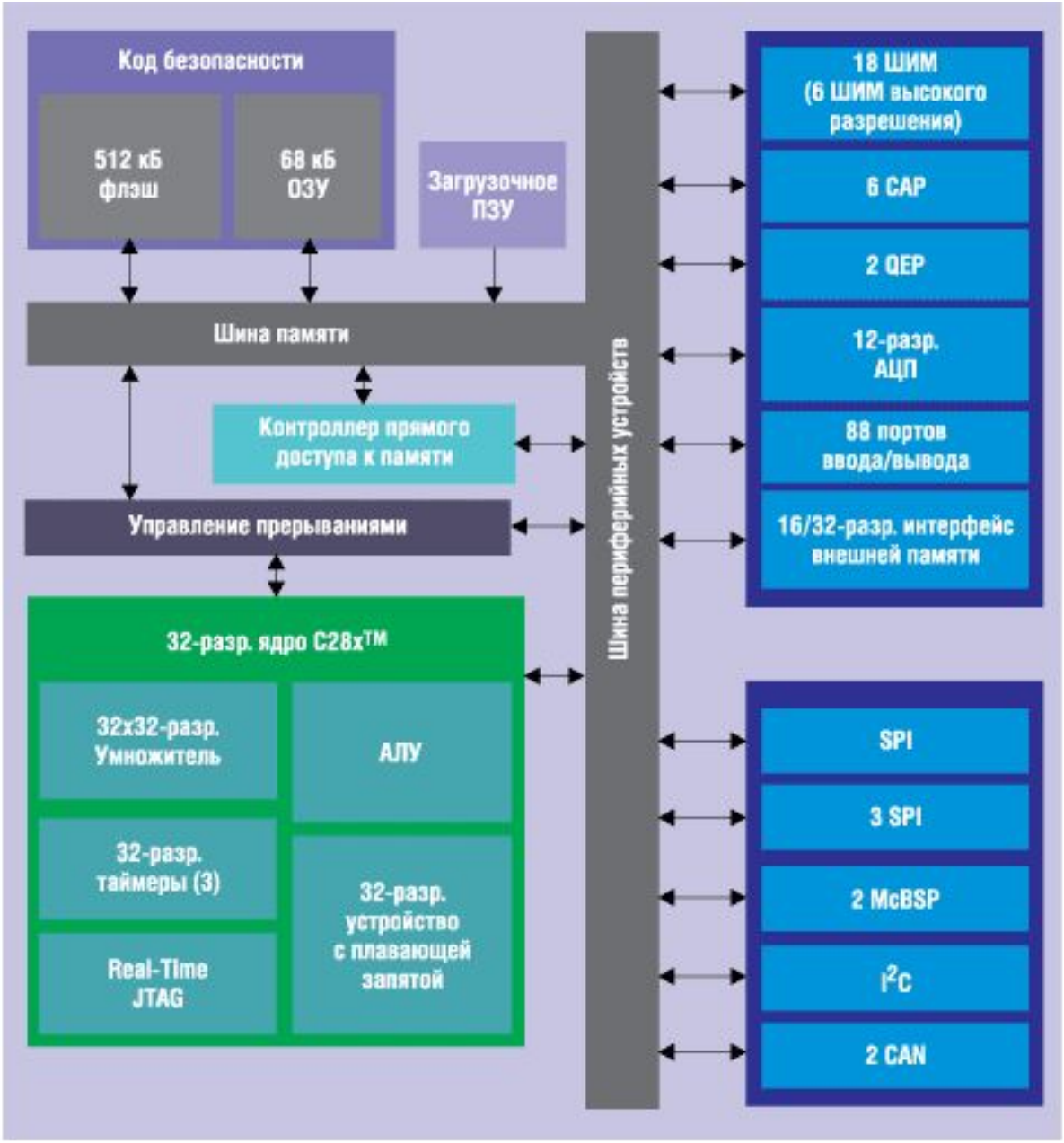
# TMS320C2000™ DSC Family



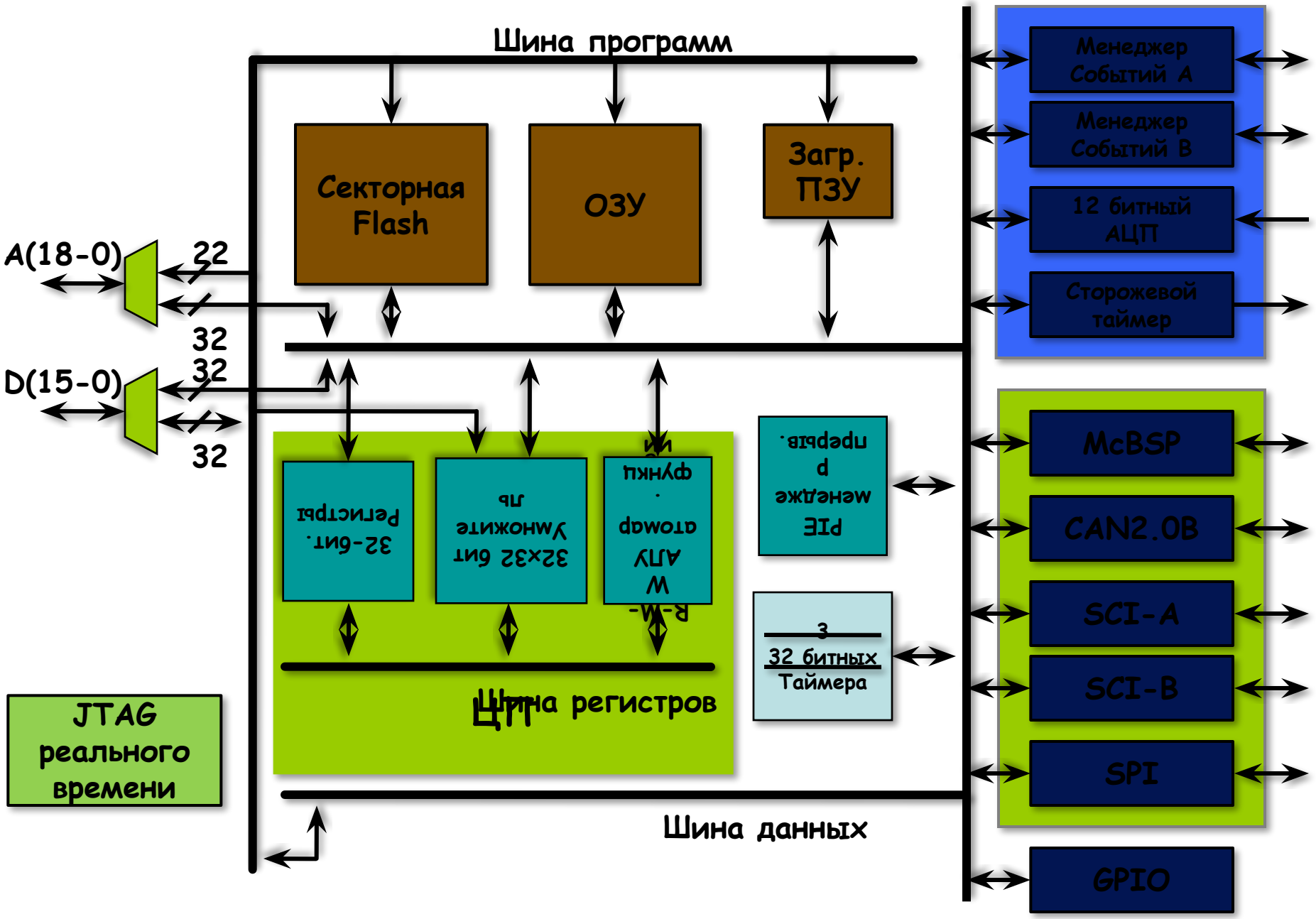

*TMS320C2000 Digital Signal Controller Platform Roadmap*

*The C2000™ controller platform provides an optimized combination of DSP performance and MCU integration for digital control systems.*


Vac
Rectified AC Voltage Feedback
BS1
BS3
BS2
Bridge
PFC Out
[Main]-J2
PFC-2PhIL
Vpfc Out feedback
PWM-4B
PWM-4A
Phase-Leg Current Sense
BS4
BS5
BS6
Inverter Bus Voltage Feedback
DC-Bus
15 V
PWM-1A
PWM-1B
PWM-2A
PWM-2B
PWM-3A
PWM-3B
IPM
1H
2H
3H
1L
2L
3L
Phase Current Feedback
Inverter Bus Current Feedback
Voltage Sensing
3 Phase Motor
spare
Inc. Encoder /Taco
QEP/ CAP
Aux Power Supply
15 V
5 V
C2000 MCU
CPU 32 Bit
CAN UART I2C
HOST
ADC 12 Bit
Vref
PWM-1
PWM-2
PWM-3
PWM-4
CAP-1
QEP

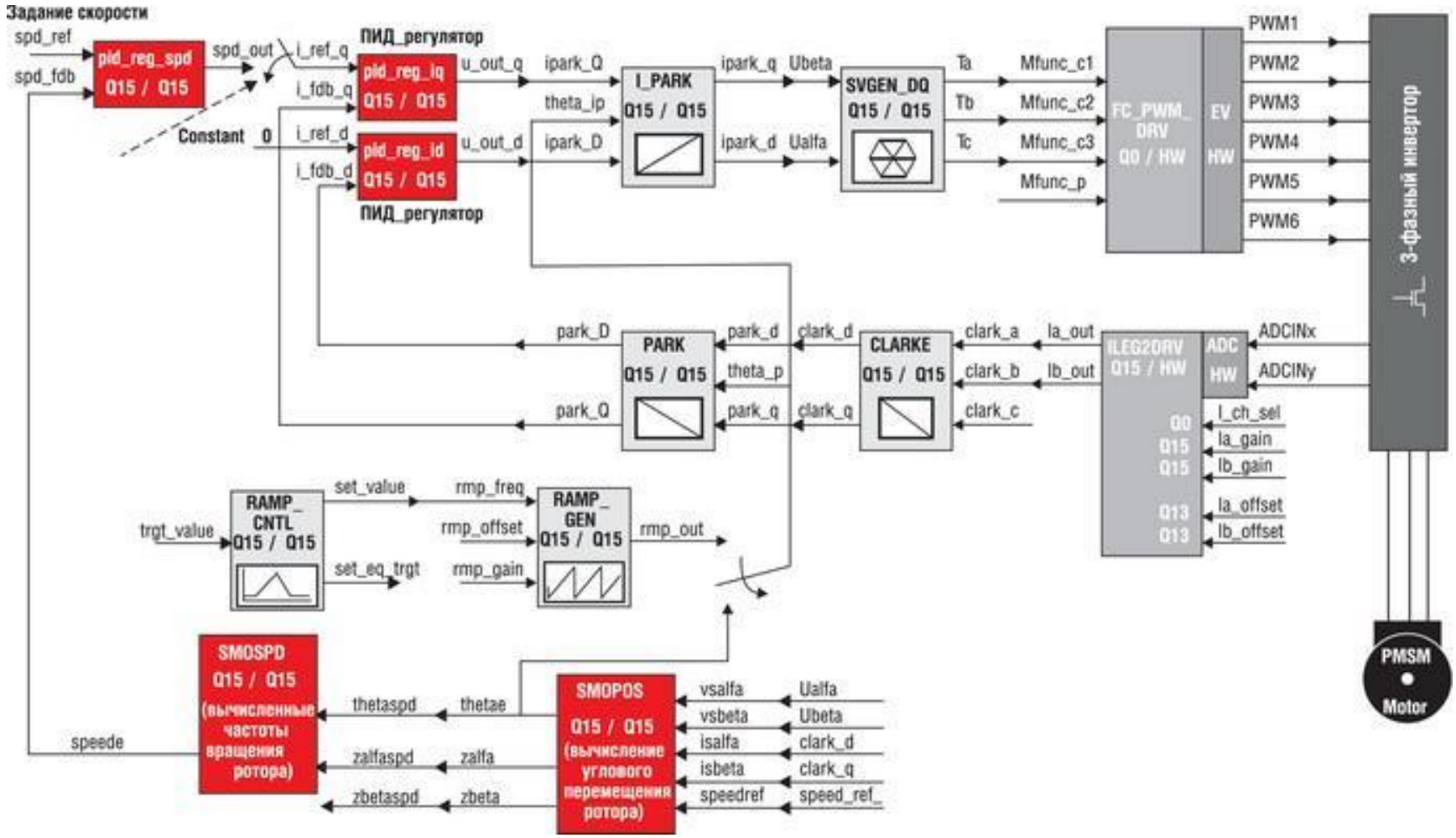

Код безопасности
512 кБ флэш
68 кБ ОЗУ
Загрузочное ПЗУ
Шина памяти
Контроллер прямого доступа к памяти
Управление прерываниями
32-разр. ядро C28x™
32x32-разр. Умножитель
АЛУ
32-разр. таймеры (3)
32-разр. устройство с плавающей запятой
Real-Time JTAG
Шина периферийных устройств
18 ШИМ (6 ШИМ высокого разрешения)
6 CAP
2 QEP
12-разр. АЦП
88 портов ввода/вывода
16/32-разр. интерфейс внешней памяти
SPI
3 SPI
2 McBSP
I2C
2 CAN

# C281x Блок схема

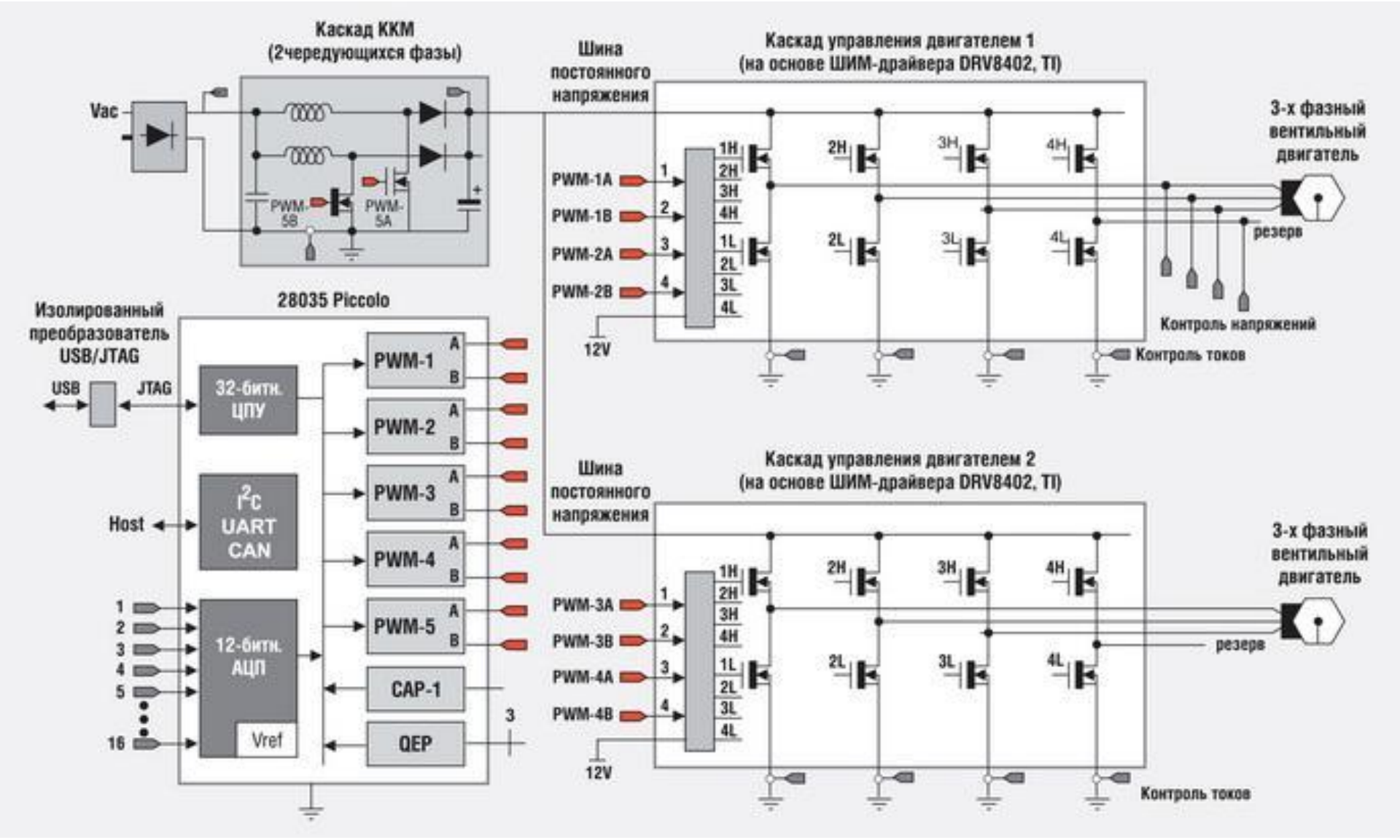


Digital Signal
Controller
3V3

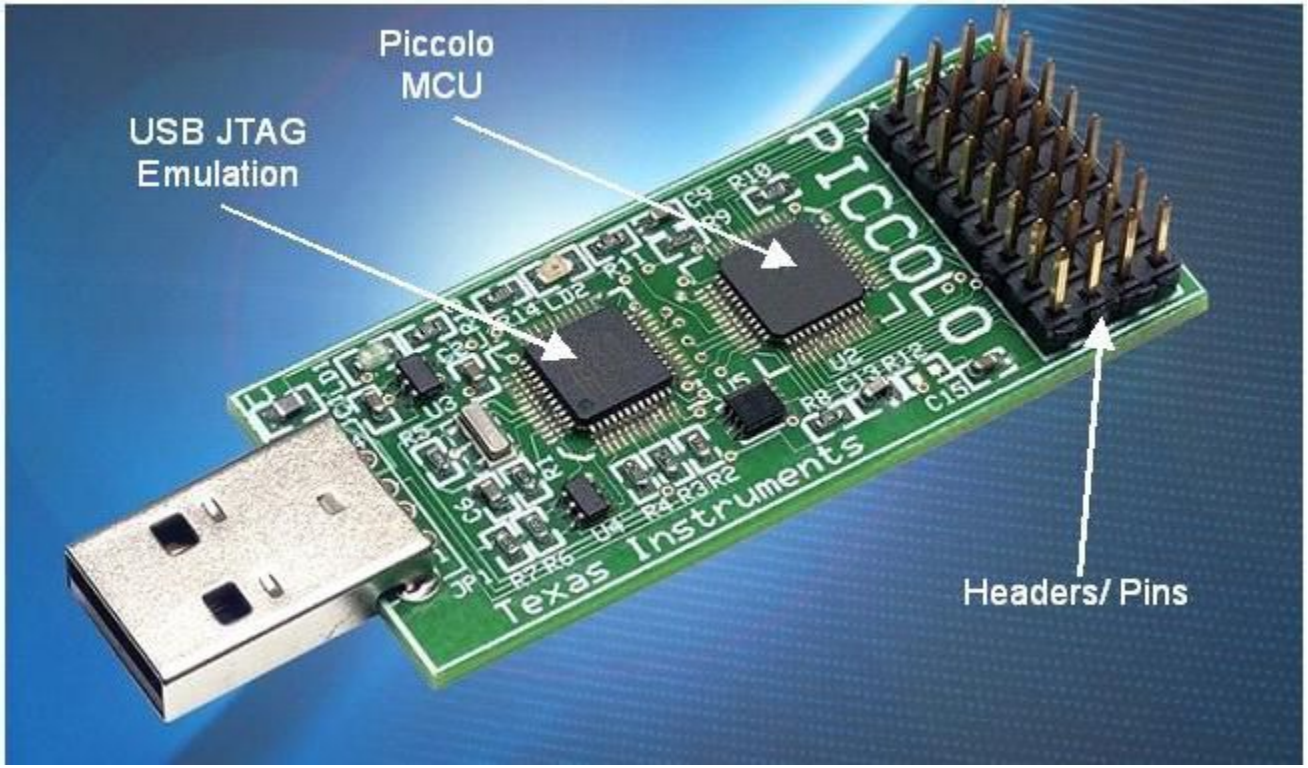
**Обобщенная структура микроконтроллеров Piccolo**



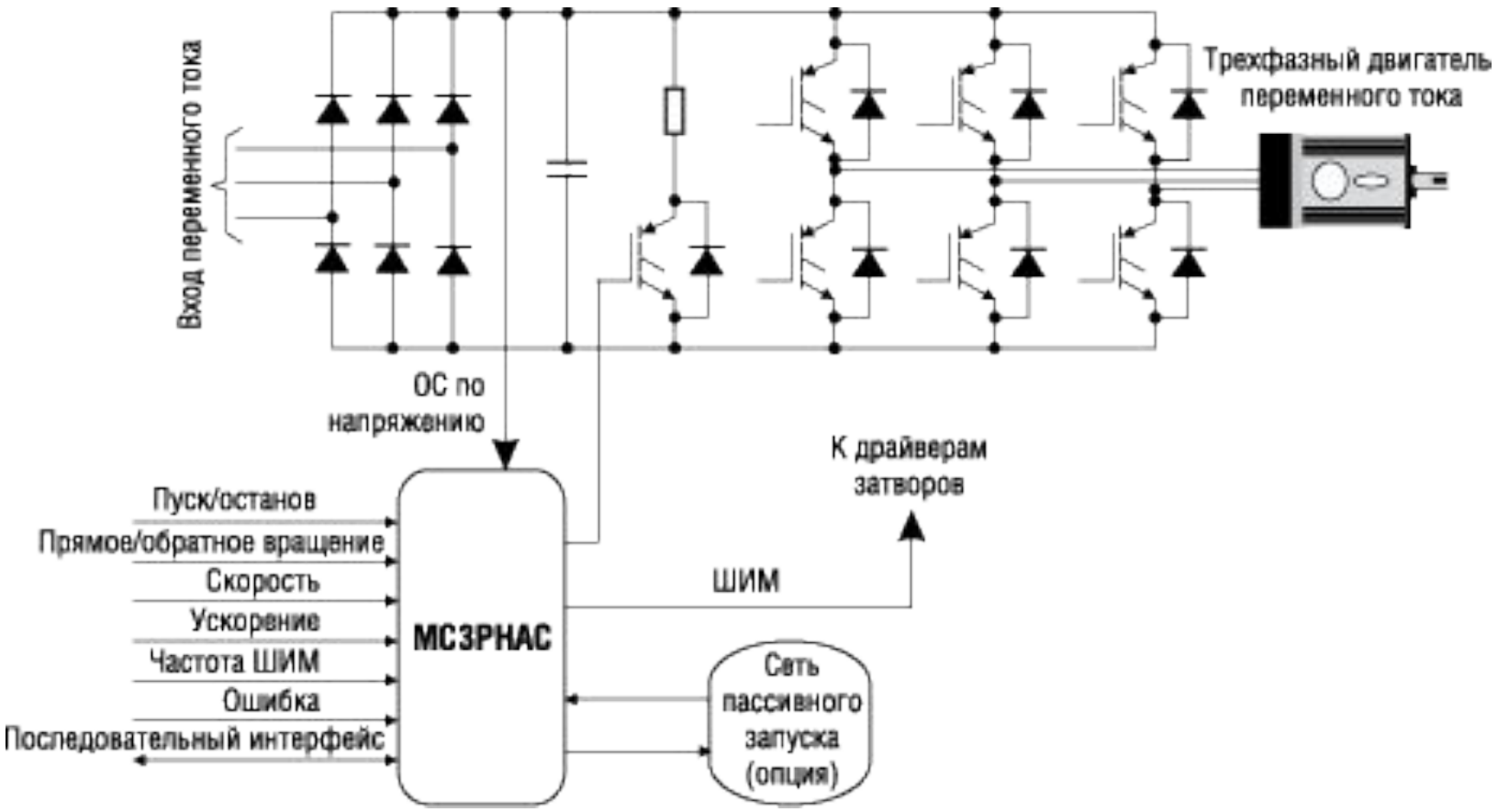

**Структурная схема системы векторного управления вентильным двигателем с косвенной оценкой положения и частоты вращения ротора**



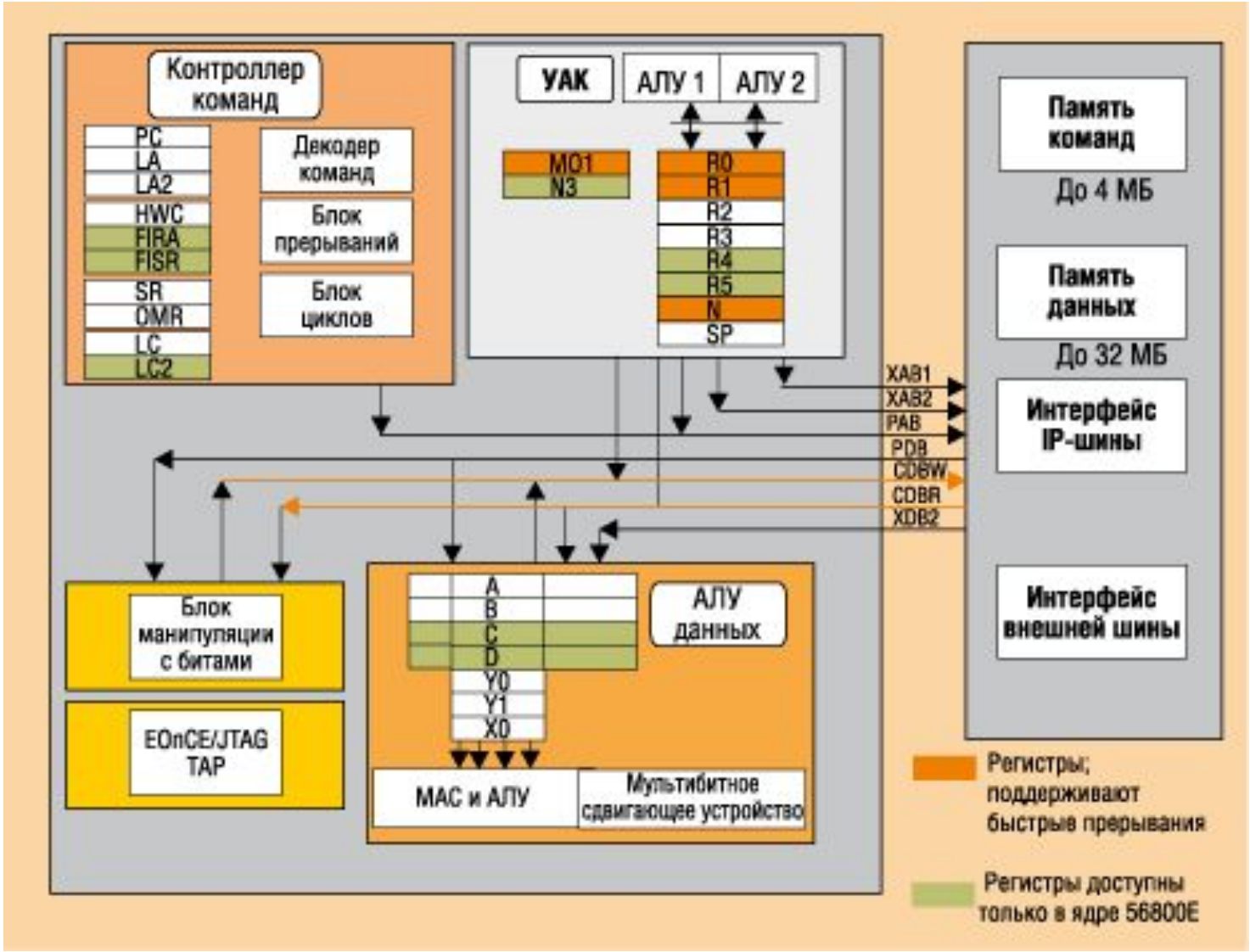

**Система управления двумя вентильными двигателями и каскадом ККМ на основе МК Piccolo**



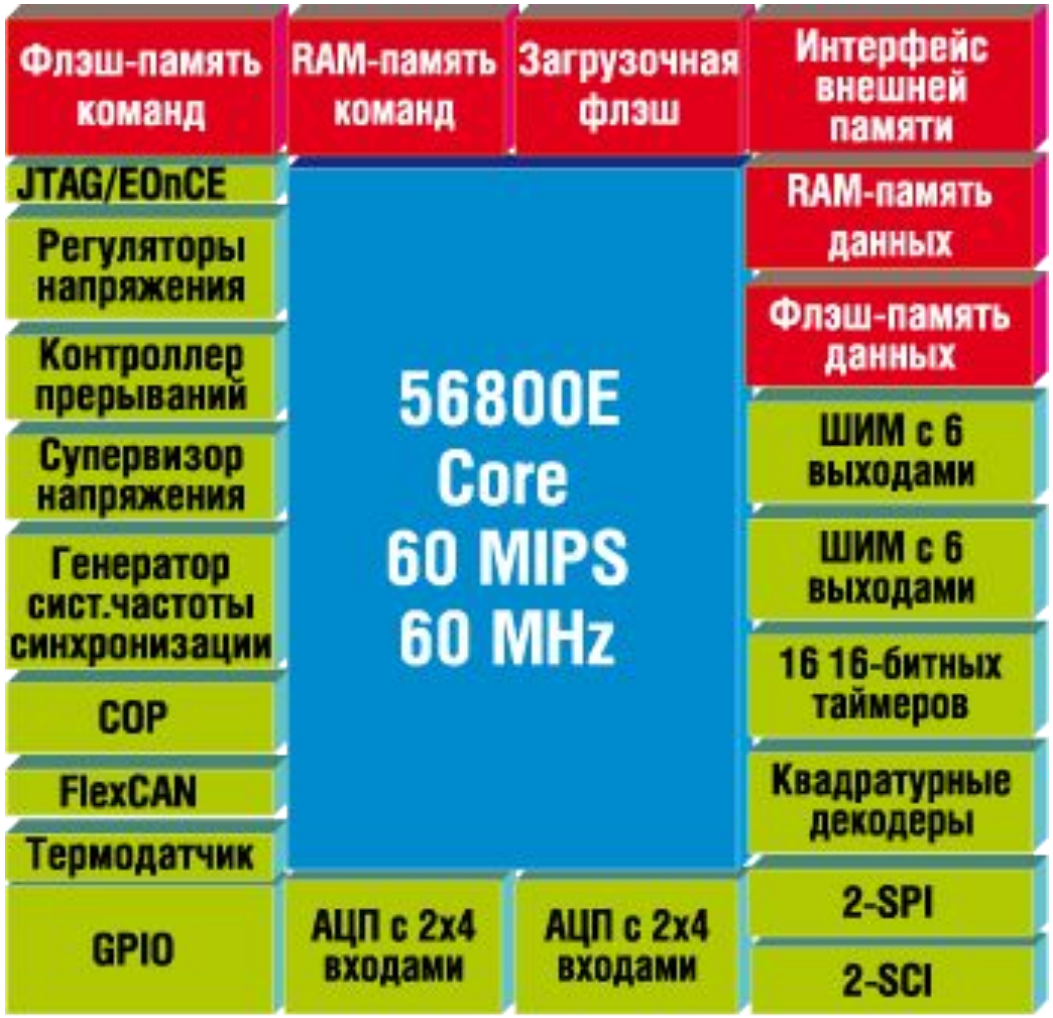

**На рисунке выше:** ControlSTICK Piccolo TMX20F28027 Деталь№: TMDX28027USB $39




**Система управления асинхронным электродвигателем на базе MC3PHAC**

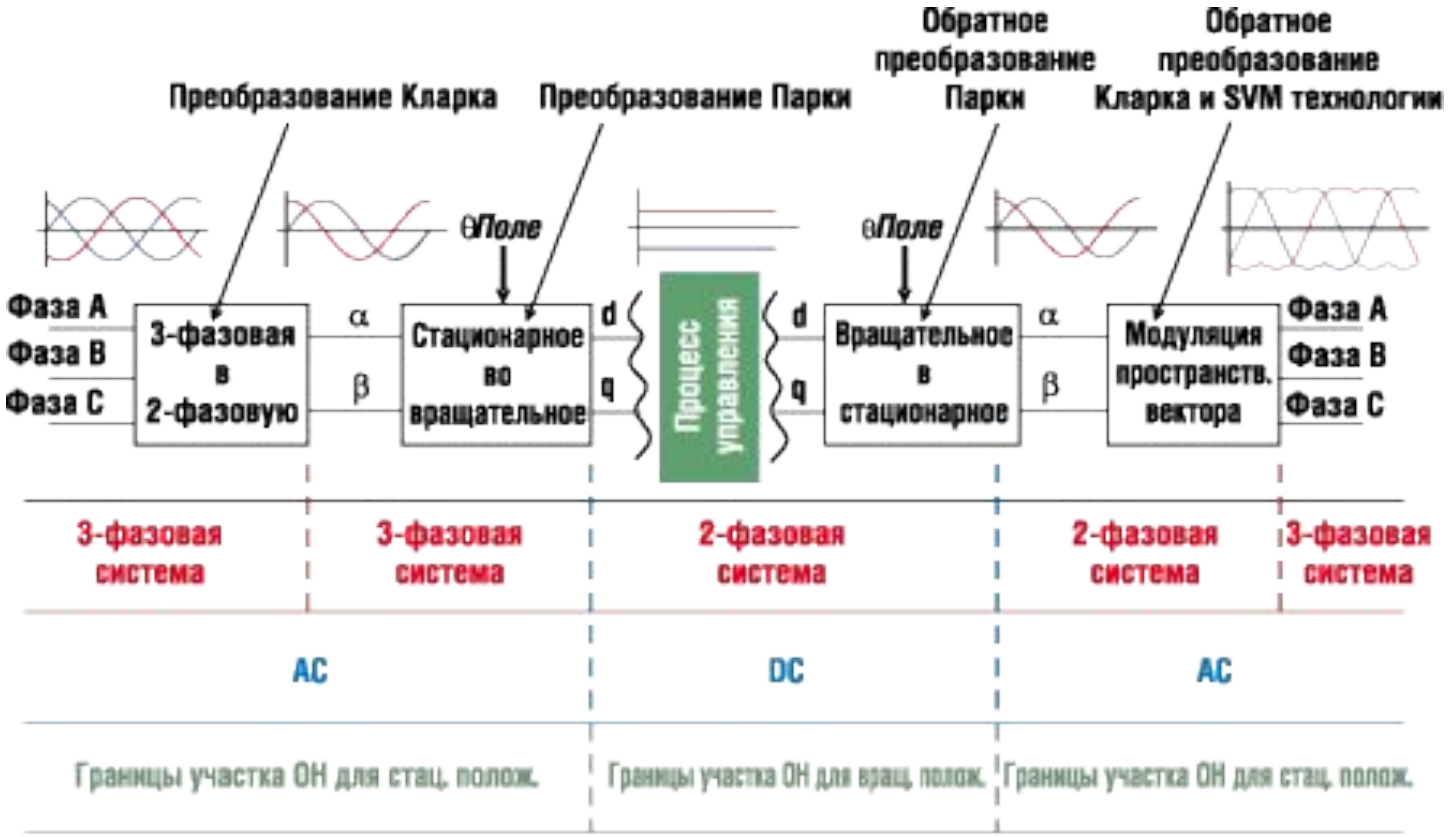



**Ядро 56800E цифровых сигнальных контроллеров 56F8xxx**

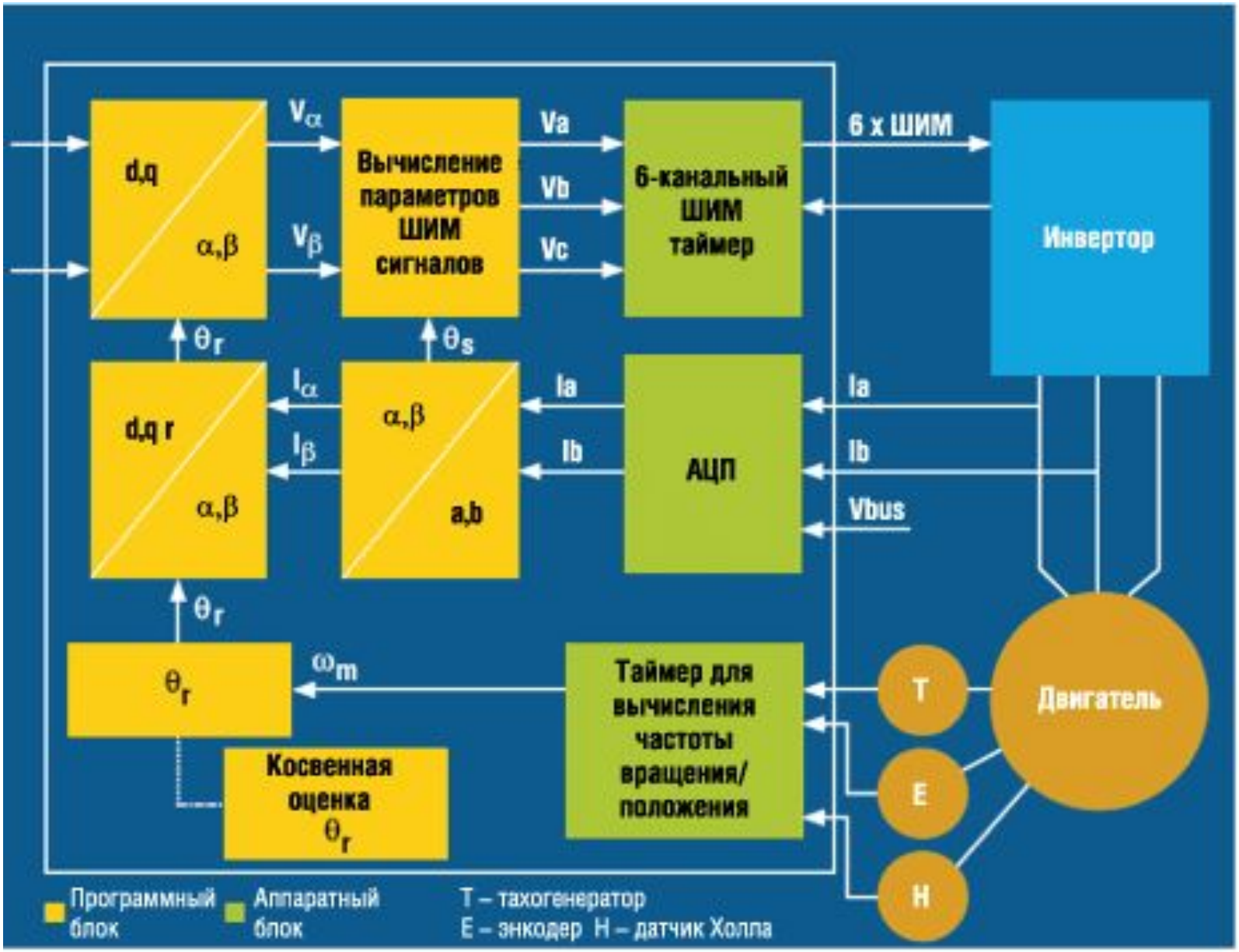



**Ядро и периферийные устройства серии 56F83xx**

**Состав библиотеки Motor Control Library for 56F800E**

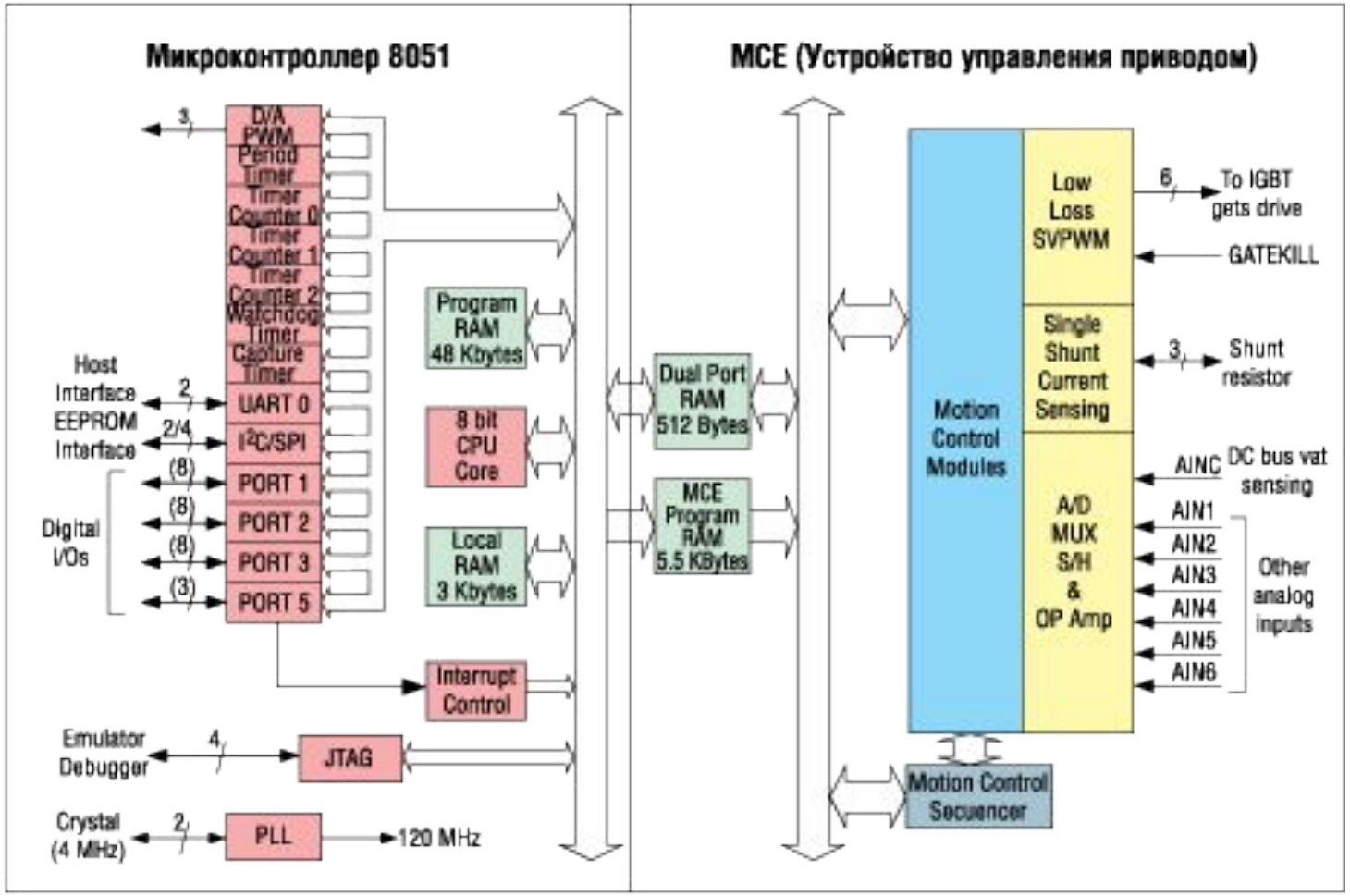



**Примеры работы функций преобразования**

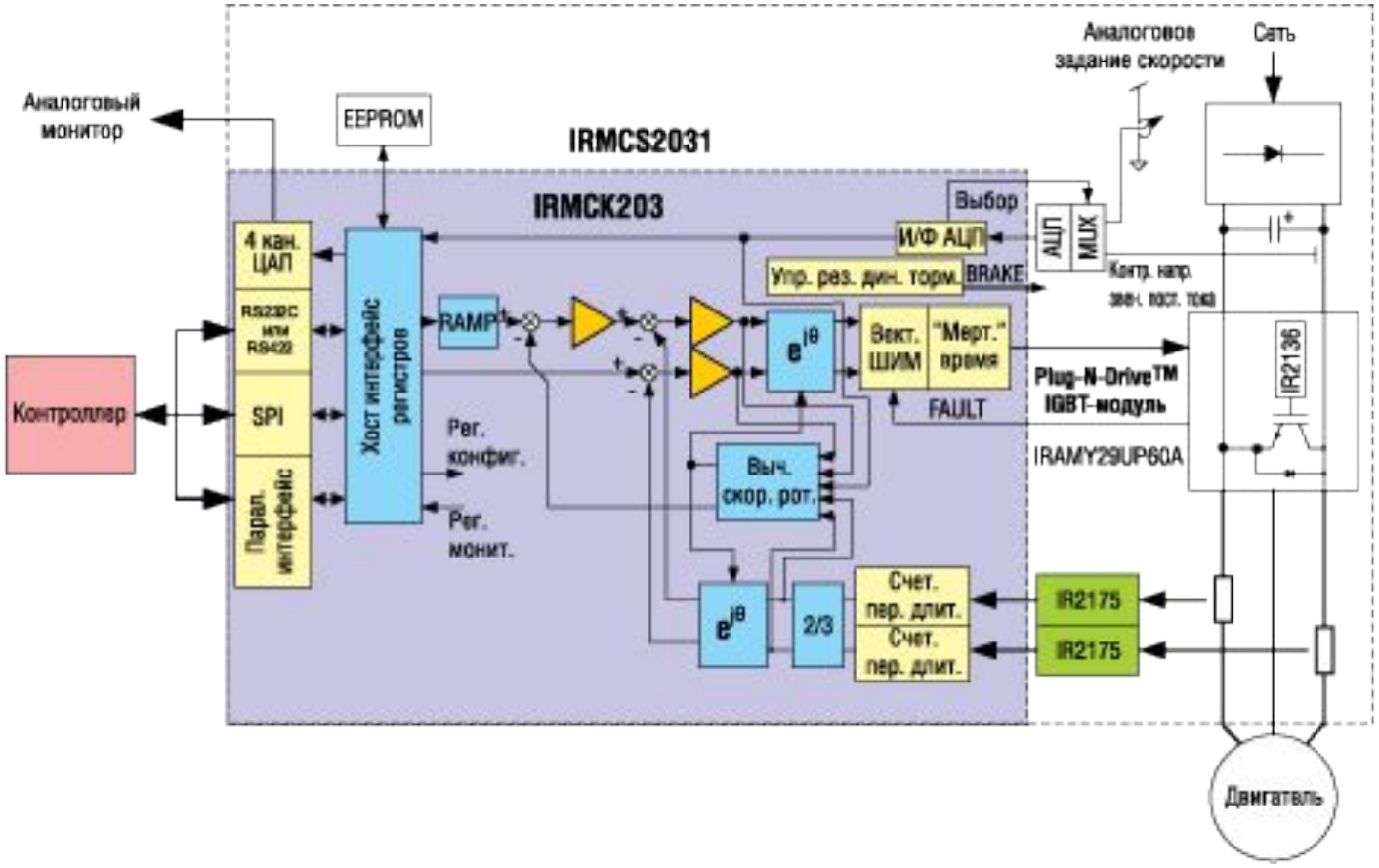


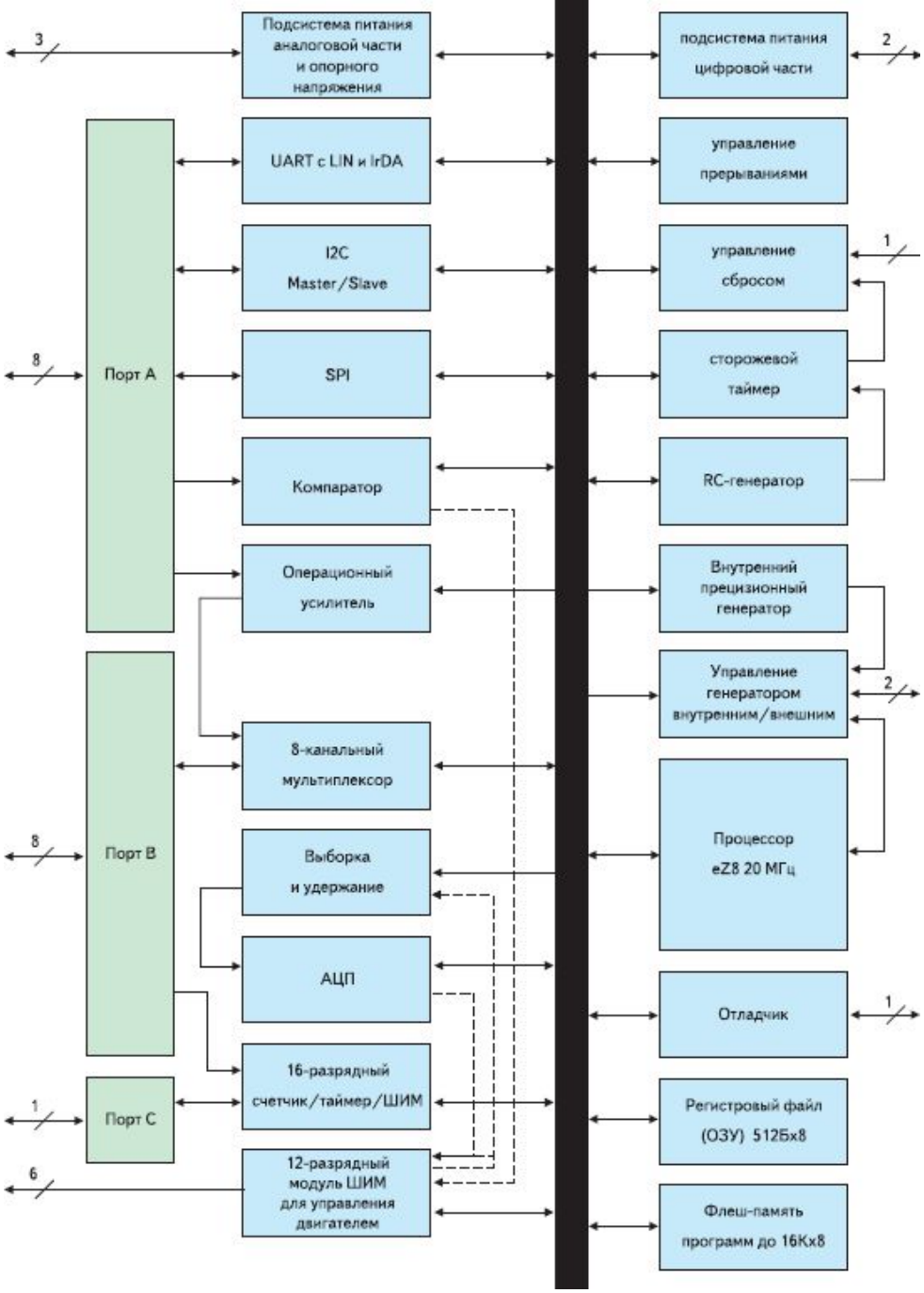

**Функциональная схема устройства векторного управления электродвигателем на основе МК STM32**

компания International Rectifier




Внутренняя структура контроллера серии IRMCK/ IRMCF 341


Аналоговый монитор
EEPROM
IRMCS2031
IRMCK203
Аналоговое задание скорости
Сеть
Выбор
И/Ф АЦП
АЦП
MUX
Упр. рез. дин. торм.
BRAKE
Контр. напр. звен. пост. тока
4 кан. ЦАП
RS232C или RS422
SPI
Парал. интерфейс
Хост интерфейс регистров
RAMP
Рег. конфиг.
Рег. монит.
Вект. ШИМ
"Мерт." время
FAULT
Plug-N-Drive™ IGBT-модуль
IRAMY29UP60A
IR2136
Выч. скор. рот.
Счет. пер. длит.
Счет. пер. длит.
2/3
IR2175
IR2175
Контроллер
Двигатель


3
Подсистема питания аналоговой части и опорного напряжения
подсистема питания цифровой части
2
UART с LIN и IrDA
управление прерываниями
I2C Master/Slave
управление сбросом
1
8
Порт A
SPI
сторожевой таймер
Компаратор
RC-генератор
Операционный усилитель
Внутренний прецизионный генератор
Управление генератором внутренним/внешним
2
8-канальный мультиплексор
8
Порт B
Выборка и удержание
Процессор eZ8 20 МГц
АЦП
Отладчик
1
16-разрядный счетчик/таймер/ШИМ
1
Порт C
Регистровый файл (ОЗУ) 512Бх8
12-разрядный модуль ШИМ для управления двигателем
6
Флеш-память программ до 16Кх8

Применение микроконтроллеров и DSP-процессоров ведущих производителей для управления устройствами силовой электроники

| Компания | Технические решения и электронные компоненты | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Техническое решение | Тип средства разработки | Микроконтроллеры | DSP-процессоры | Источник информации |
| Freescale Semiconductor | Управление однофазным электродвигателем переменного тока | Базовый проект | M68HC08 | | [9] |
| | Управление вентильно-реактивным 3-фазным электродвигателем с датчиками Холла | | | DSP56F805 | [10] |
| | Управление шахтерской лампой | | MC9S08QG4 | | [11] |
| | Программное обеспечение для проектирования микроконтроллерных систем управления на основе нечеткой логики | Программное средство | M68HC12 | | [12] |
| Microchip Technology | Управление бесколлекторным электродвигателем постоянного тока (с датчиком или без датчика) | Плата разработки | PIC18F2331<br>PIC18F2431 | dsPIC30F2010<br>dsPIC30F3010 | [13] |
| | Управление импульсным источником питания | | | dsPIC30F2020 | [14] |
| | Управление электродвигателем поднимания оконного стекла в автомобиле с функцией антисдавливания и управлением от однопроводной коммуникационной сети | Базовый проект | PIC16F688 | | [15] |
| Silicon Laboratories | Управление шаговым электродвигателем | | C8051F300 | | [16] |
| | Управление бесколлекторным электродвигателем постоянного тока | | C8051F310 | | [17] |
| | Примеры программ для управления различными типами электродвигателей | Программный пакет | C8051F3xx | | [18] |
| STMicroelectronics | Управление электродвигателем переменного тока или лампой накаливания | Базовый проект | ST7ULTRALITE | | [20] |
| | Управление различными типами электродвигателей переменного тока | Оценочный комплект | ST7FMC2S4T6 | | [21] |
| | Понижающий преобразователь переменного тока для мощных нагрузок | Базовый проект | ST7LITES5 | | [22] |
| Texas Instruments | Импульсный источник питания | Технический отчет | | TMS320F280x | [23] |
| | Программное обеспечение для разработки систем управления всеми типами электродвигателей | Программный пакет | | TMS320C2000 | [24] |
| | Прорамное обеспечение для разработки всех типов силовых преобразователей и систем коррекции коэффициента мощности | | | TMS320C2000 | [24] |