Модуль ePWM (ШИМ)

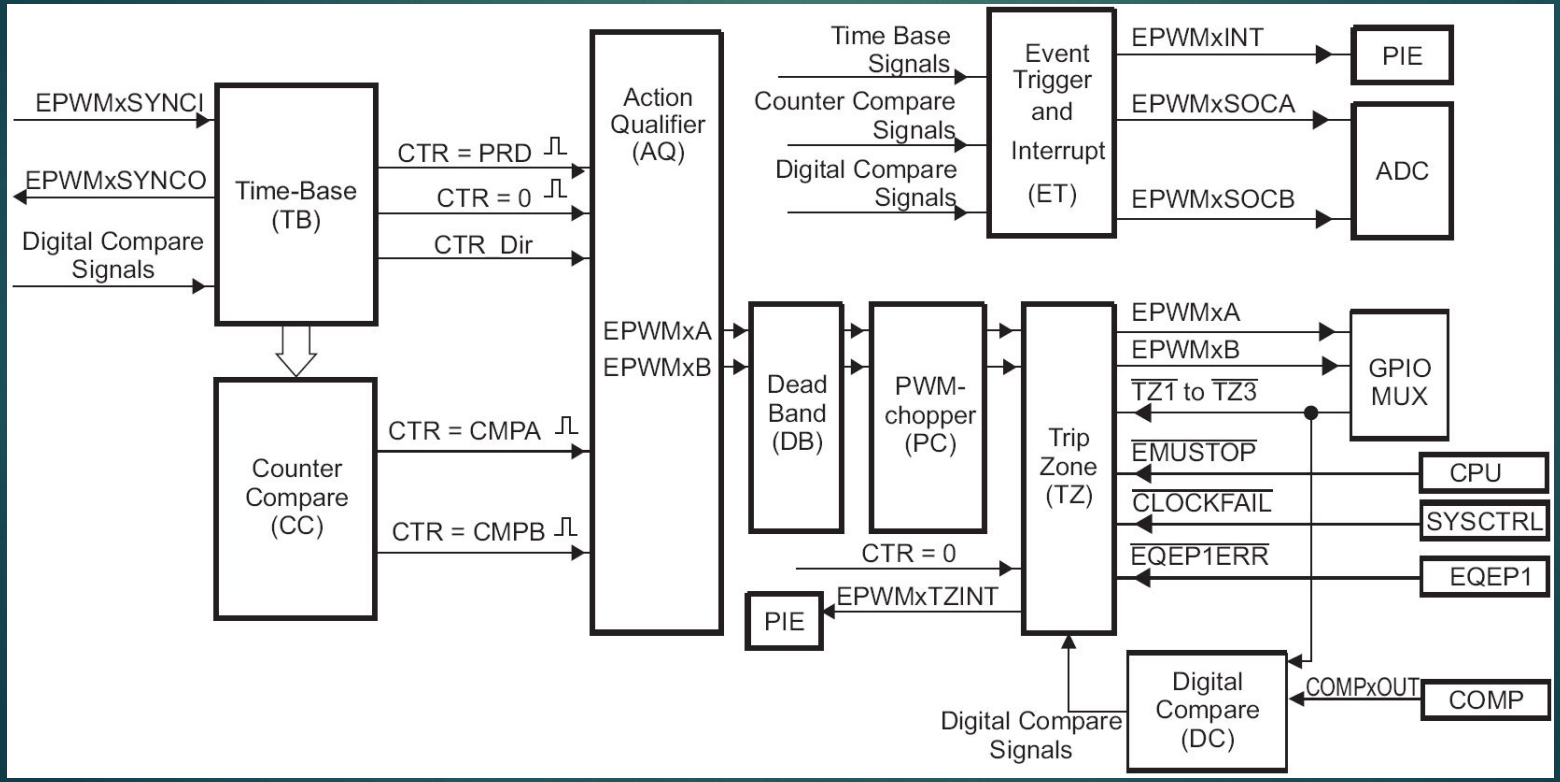
Назначение, внутренняя архитектура и возможности

Назначение модуля ШИМ

- Модуль ePWM (Enhanced Pulse-Width Modulator) позволяет генерировать ШИМ-сигнал сложной формы с минимальным задействованием процессора.
- ePWM модуль может изменять уровень GPIO процессора в автоматическом режиме, без необходимости вручную задавать уровень сигнала. Каждый модуль может управлять двумя выводами. Всего в микроконтроллере F28035 есть 6 таких модулей.
- Этот модуль имеет множество гибких настроек, позволяющих задать частоту и форму несущего сигнала, его синхронизацию с внешними сигналами, реакцию на возникновение аварийной ситуации, автоматическое управление двумя выводами в комплиментарном режиме с обеспечением мёртвого времени и множество других опций.
- Выходами являются сигналы A и B, которые меняют свой уровень с высокого на низкий и наоборот в зависимости от настроек модуля ePWM. При помощи регистров мультиплицирования GPIO (GPxMUX) эти каналы могут быть выведены на разные выводы микроконтроллера.

Структура модуля ШИМ

Модуль ШИМ имеет сложную структуру и состоит из множества подмодулей, каждый из которых имеет свою функцию: счетчик для создания несущего сигнала, модуль сравнения уставки с несущим сигналом, модуль действия при сравнении, модуль мёртвого времени и другие.



Настройка модуля ШИМ

Под настройкой модуля ШИМ подразумевается настройка всех или нескольких его подмодулей. Каждый подмодуль имеет по несколько регистров для конфигурации. Все регистры подмодулей объединяются в группу регистров с названием «***EPwmXRegs***», где X означает номер модуля ePWM.

```
void initPWM (void) {
    // Задать способ счёта "сверху вниз"
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_DOWN;
    // Задать период счётчика равным 1000 тактов
    EPwm1Regs.TBPRD = 1000;
    // Отключать канал A при достижении счётчиком нуля
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.ZRO = AQ_CLEAR;
    // Включать канал A при сравнении счётчика с уставкой A
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_SET;
    // Запускать АЦП при каждом достижении нуля
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCAEN = 1;
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCASEL = ET_CTR_ZERO;
    EPwm1Regs.ETPS.bit.SOCAPRD = 1;
}
```

Подмодуль счётчика

Подмодуль *Time-Base Submodule* выполняет функцию создания несущего сигнала для ШИМ и фактически представляет собой счетчик. Основные регистры для настройки этого подмодуля (в скобках указано значение по умолчанию):

Имя регистра	Размер	Значение
`TBPRD (0)`	16 бит	Период счётчика
`TBCTL.bit.CTRMODE (3)`	2 бита	Способ счёта: 0 – счёт вверх, 1 – счёт вниз, 2 – счёт вверх-вниз, 3 – остановлен
`TBCTL.bit.HSPCLKDIV (1)*`	3 бита	Делитель частоты счёта 1: 0 → div1 = 1, 1 → div1 =2, 2 → div1 = 4, 3 → div1 = 6…
`TBCTL.bit.CLKDIV (0)*`	3 бита	Делитель частоты счёта 2: div2 = 2^{CLKDIV}

**Итоговая частота счёта считается по формуле: $f = \frac{SYSCLKOUT}{div1 \cdot div2}$, где SYSCLKOUT равен частоте процессора (60 МГц для F28035).*

Здесь приведены не все доступные регистры. С полным списком можно ознакомиться в соответствующей документации – SPRUGE9E

Подмодуль счётчика

Поведение счётчика при разных настройках регистра TBCTL.bit.CTRMODE

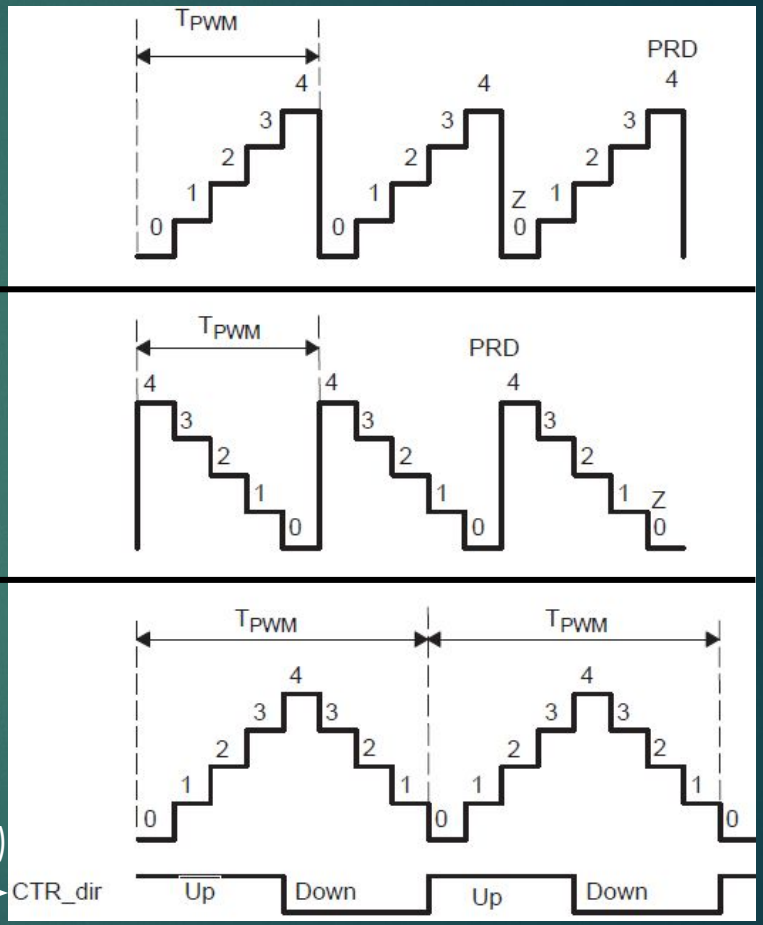
Во всех примерах период равен 4 тактам: TBPRD = 4

Бит TBSTS.bit.CTRDIR отображает текущее направление счёта:
1 – счёт вверх, 0 – счёт вниз

CTRMODE = 0
(счёт вверх)

CTRMODE = 1
(счёт вниз)

CTRMODE = 2
(счёт вверх-вниз)



Подмодуль сравнения

Подмодуль *Counter Compare* непрерывно проверяет текущее значение счётчика и сравнивает его с двумя заданными уставками. Когда счётчик сравнивает с этими уставками, подмодуль сравнения генерирует *событие сравнения*, то есть выдаёт импульс, означающий, что счётчик сравнялся с уставкой. По этим событиям другие подмодули могут предпринимать какие-либо действия (переключение вывода, запуск АЦП и пр.). Основные регистры настройки:

Имя регистра	Размер	Значение
`CMPA.half.CMPA (0)`	16 бит	Уставка сравнения A
`CMPB (0)`	16 бит	Уставка сравнения B
`CMPCTL.bit.LOADAMODE (0)` `CMPCTL.bit.LOADBMODE (0)`	1 бит	Регистры определяют, в какой момент уставки CMPA и CMPB будут перезагружены: 0 – когда счётчик будет равен 0; 1 – когда счётчик будет равен периоду; 2 – когда счётчик будет равен 0 или периоду; 3 - никогда

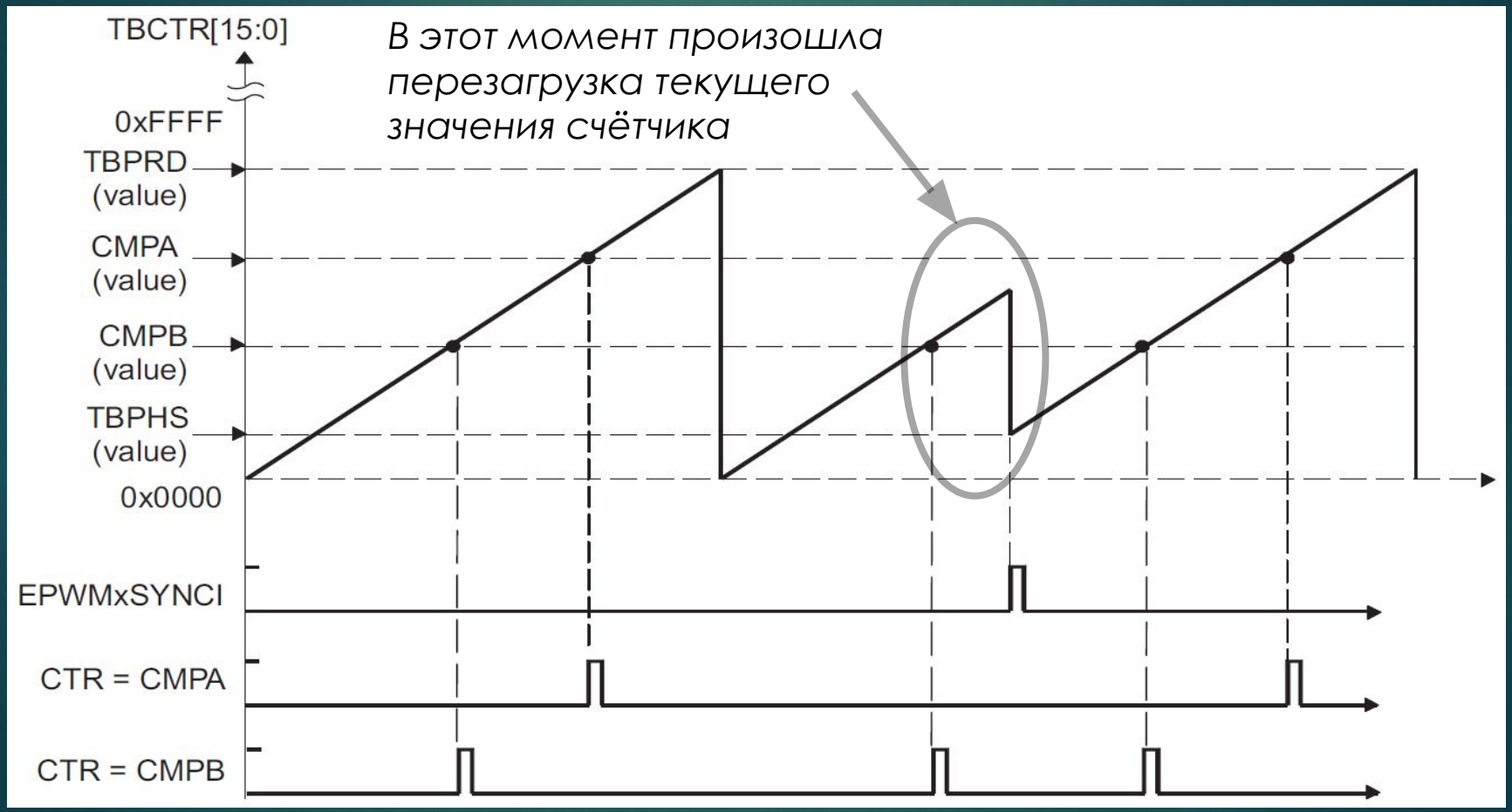
Теневые регистры

Регистры, хранящие уставки сравнения CMPA и CMPB являются *теневыми*. Это значит, что при записи в них какого-то значения уставки сравнения не обязательно сразу примут записанные значения. Момент фактического применения определяется регистром LOADAMODE/ LOADBMODE.

Однако можно настроить подмодуль сравнения так, чтобы уставки сравнения принимали записанное значение сразу же. Об этом можно прочитать в документации.

Подмодуль сравнения

Данный рисунок демонстрирует работу подмодуля сравнения. Каждый раз, когда значение счётчика совпадает с одной из уставок, генерируется соответствующий импульс.

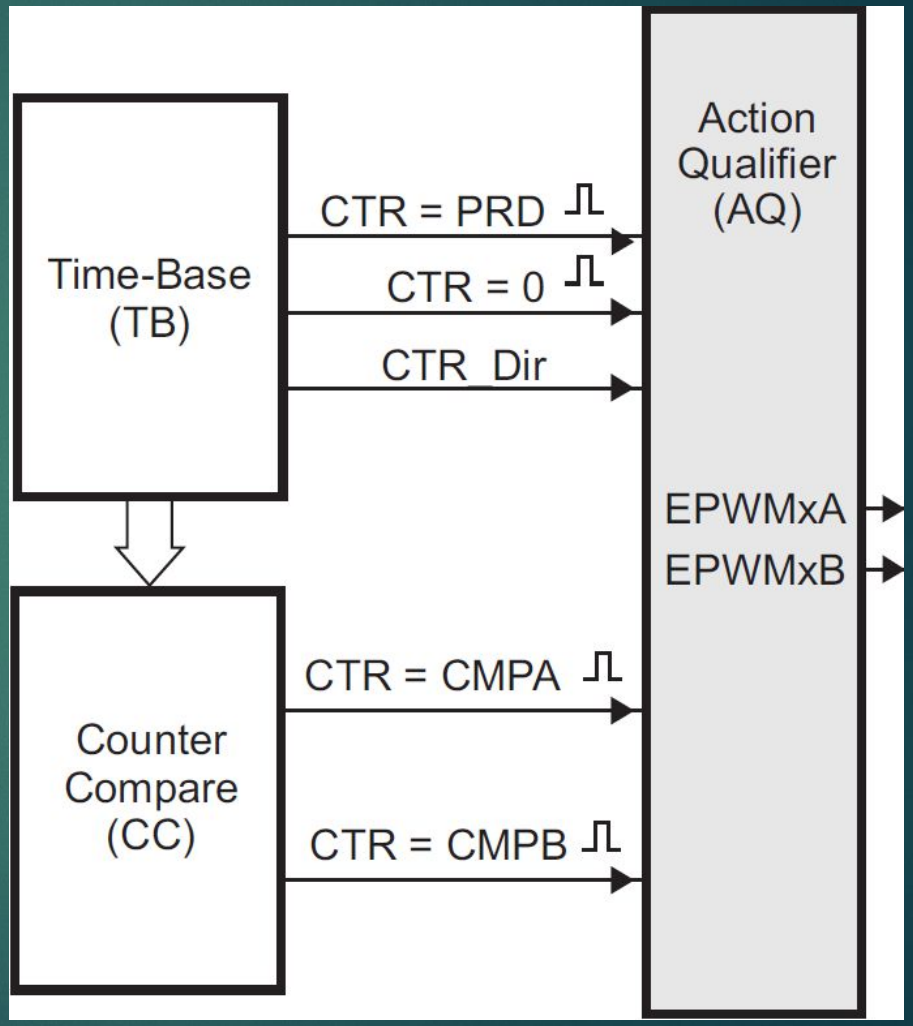


Подмодуль действия

Подмодуль Action Qualifier играет важнейшую роль в формировании выходного сигнала. Он определяет, какие события в какие действия должны быть преобразованы. Например «Событие «Счётчик равен уставке CMPA» должно установить высокий уровень канала A» и т.п.

События, для которых можно определить действия:
TBCTR == CMPA
TBCTR == CMPB
TBCTR == TBPRD
TBCTR == 0

Кроме того можно учитывать направление счёта, при котором произошло событие



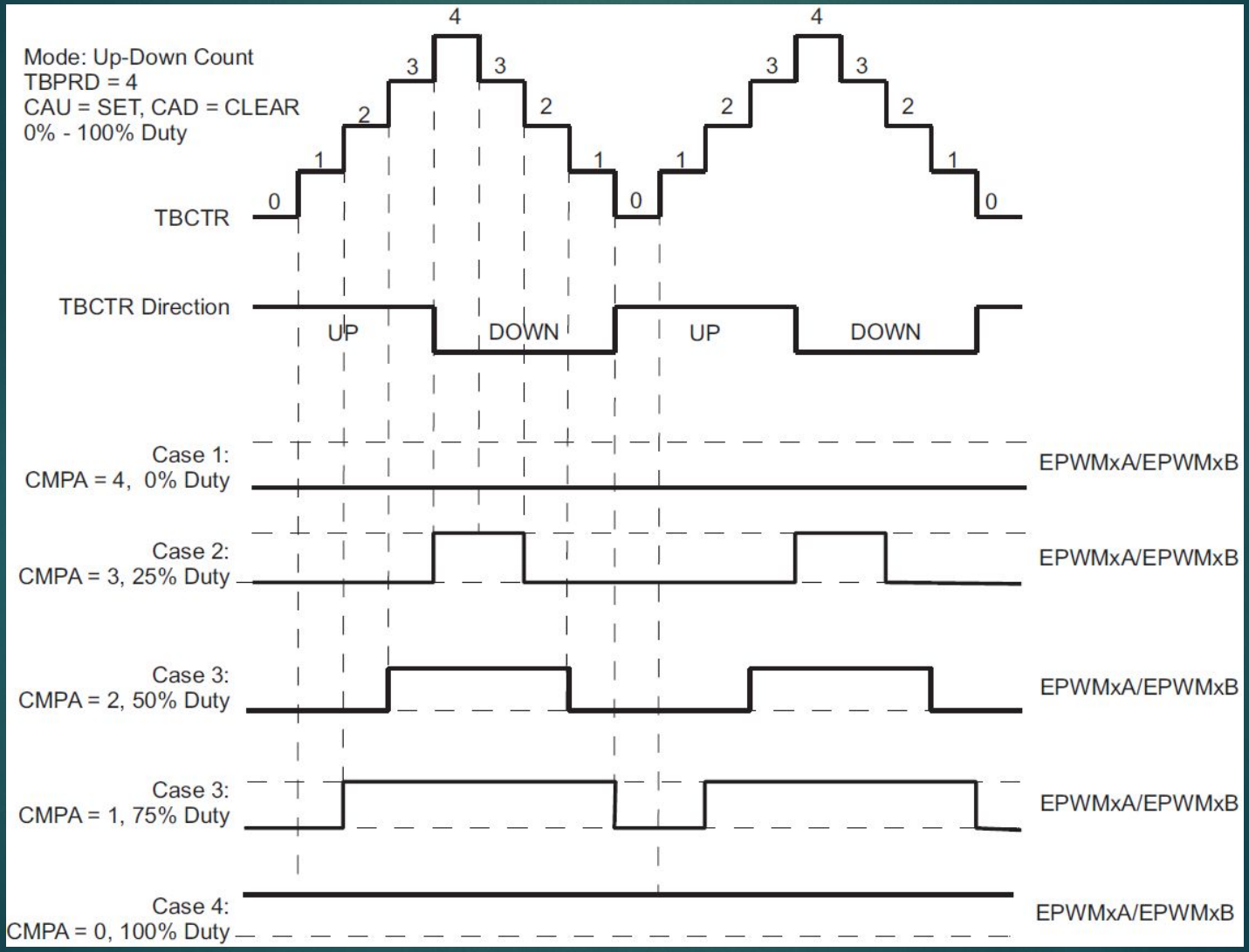
Подмодуль действия

Действия, совершаемые с каналами по событиям, настраиваются в регистрах подмодуля. В регистры, перечисленные в таблице, можно записать следующие значения:
0 – не предпринимать никаких действий, **1** – выдать высокий уровень на канал **2** – выдать низкий уровень на канал x, **3** – изменить уровень канала x (т.е. если был высокий, то станет низкий, и наоборот)

Для каналов A и B есть два одинаковых регистра AQCTLA и AQCTLB, которые определяют действия каналов A и B соответственно.

Имя регистра	Размер	Значение
`AQCTLx.bit.CAU`	2 бита	Действие при TBCTR == CMPA, когда счётчик считал вверх
`AQCTLx.bit.CAD`	2 бита	Действие при TBCTR == CMPA, когда счётчик считал вниз
`AQCTLx.bit.CBU`	2 бита	Действие при TBCTR == CMPB, когда счётчик считал вверх
`AQCTLx.bit.CBD`	2 бита	Действие при TBCTR == CMPB, когда счётчик считал вниз
`AQCTLx.bit.PRD`	2 бита	Действие при TBCTR == TBPRD
`AQCTLx.bit.ZRO`	2 бита	Действие при TBCTR == 0

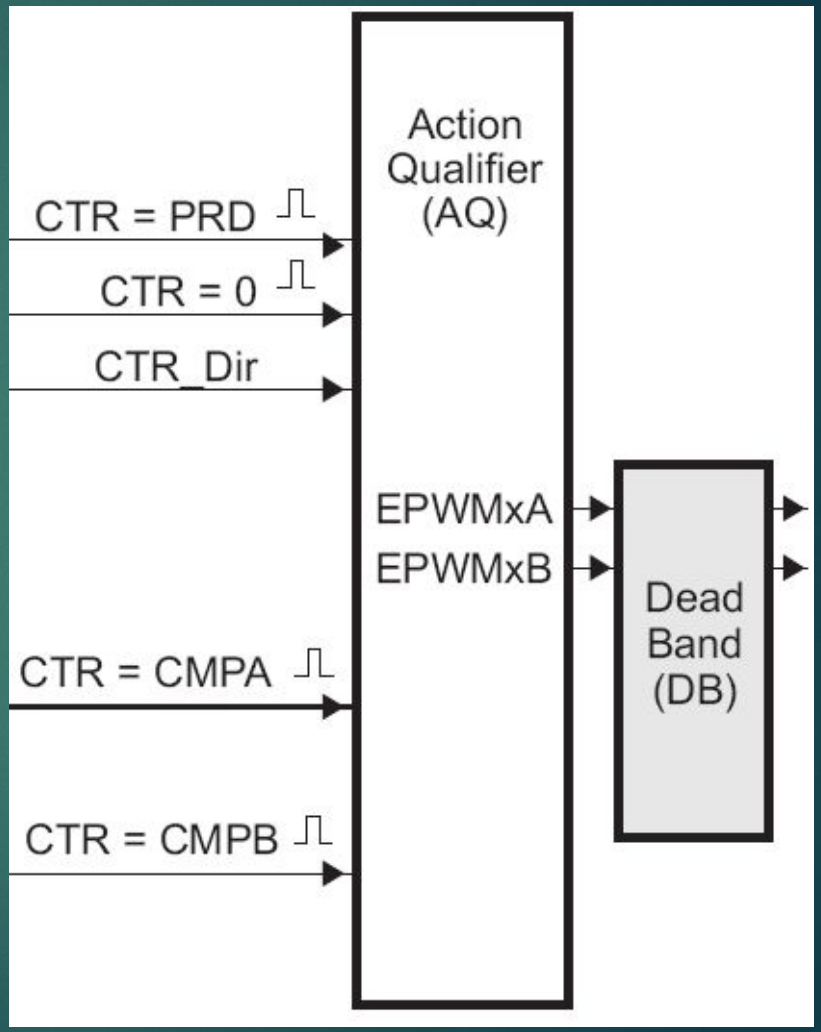
Подмодуль действия



Подмодуль мёртвого времени

Подмодуль *Dead Band* позволяет вносить задержку на включение или выключение каналов A и/или B. Таким образом можно создать паузу между, например, отключением ключа в верхней стойке инвертора и включением верхнего, чтобы избежать протекания сквозных токов в стойке. Подразумевается, что оба ключа управляются каналами A и B одного модуля ePWM.

Кроме того этот модуль позволяет автоматически создавать на одном из каналов сигнал, комплиментарный другому.

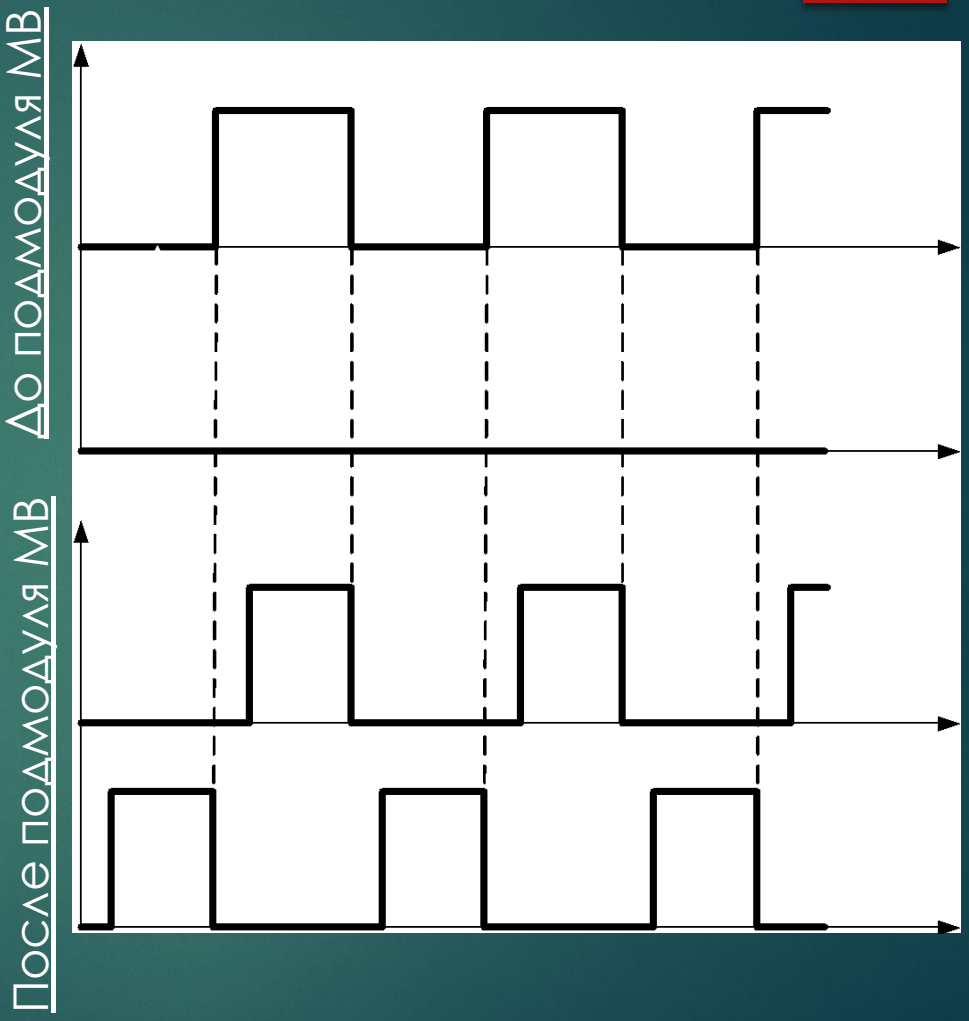


Подмодуль мёртвого времени

Рисунок демонстрирует результат настройки подмодуля мёртвого на генерацию комплиментарного сигнала канала B с добавлением мёртвого времени.

Как видно, модуль добавляет задержку на включение канала A и генерирует сигнал канала B, внося задержку между его включением и отключением канала A.

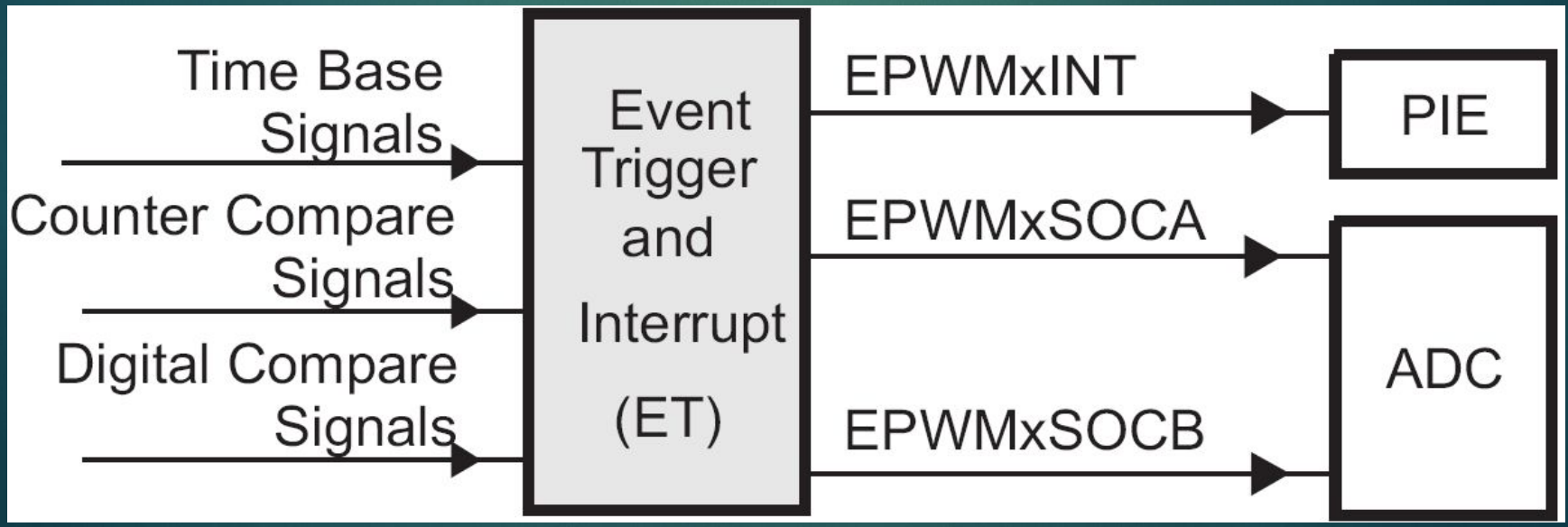
Модуль имеет очень гибкие и сложные настройки, поэтому они не здесь рассматриваются. Ознакомиться с ними можно в документации.



Подмодуль запуска событий

Подмодуль *Event Trigger* позволяет генерировать прерывания и запускать АЦП по событиям, приходящим от модуля сравнения (достижение счётчиком нуля или периода, сравнение счётчика с уставками). Это похоже на поведение подмодуля действия с той разницей, что вместо изменения состояния каналов A и B запускается АЦП или прерывание.

Кроме перечисленных событий, триггером для запуска может служить ещё и сигнал от компаратора (это одно из периферийных устройств микроконтроллера).



Подмодуль запуска событий

В таблице ниже перечислены основные и наиболее часто используемые регистры для настройки этого модуля.

Имя регистра	Размер	Значение
`ETSEL.bit.SOCAEN(0)`	1 бит	Разрешение запуска АЦП: 0 – запрещено, 1 – разрешено
`ETSEL.bit.INTEN(0)`	1 бит	Разрешение вызова прерывания: 0 – запрещено, 1 – разрешено
`ETSEL.bit.SOCASEL(0)`	3 бита	Событие для запуска АЦП
`ETSEL.bit.INTSEL(0)`	3 бита	Событие для вызова прерывания
`ETPS.bit.SOCAPRD(0)`	2 бита	Периодичность запуска АЦП
`ETPS.bit.INTPRD(0)`	2 бита	Периодичность вызова прерывания

Возможные события для регистров SOCASEL и INTSEL: 0 – событие от компаратора,
1 –TBCTR == 0, 2 – TBCTR == TBPRD, 3 – TBCTR == 0 или TBCTR == TBPRD,
4 – TBCTR == CMPA при счёте вверх, 5 – TBCTR == CMPA при счёте вниз,
6 – TBCTR == CMPB при счёте вверх, 7 – TBCTR == CMPB при счёте вверх.

Возможные варианты для регистров SOCAPRD и INTPRD: 0 – никогда не запускать АЦП / вызывать прерывание, 1 – делать это при каждом событии, 2 – делать это при каждом втором событии, 3 – делать это при каждом третьем событии

Другие подмодули

Кроме рассмотренных подмодулей, есть ещё и другие.

- Подмодуль *Trip Zone* позволяет мгновенно отключать силовые ключи при появлении определённого сигнала (низкого или высокого) на каком либо выводе микроконтроллера. На этот вывод, например, можно завести сигнал аппаратной аварии ключа.

- Подмодуль *PWM Chopper* позволяет преобразовать высокий сигнал канала A или B в последовательность коротких импульсов.

- Подмодуль *Digital Compare* обеспечивает интерфейс между модулем ePWM и компаратором и позволяет настраивать реакцию ePWM на сигналы компаратора.

Прерывания модуля ШИМ

Прерывания от подмодуля *Trip Zone* имеют более высокий приоритет, чем другие прерывания ePWM.

	INTx.8	INTx.7	INTx.6	INTx.5	INTx.4	INTx.3	INTx.2	INTx.1
INT1.y	WAKEINT	TINT0	ADCINT9	XINT2	XINT1	Reserved	ADCINT2	ADCINT1
	(LPM/WD)	(TIMER 0)	(ADC)	Ext. int. 2	Ext. int. 1	-	(ADC)	(ADC)
	0xD4E	0xD4C	0xD4A	0xD48	0xD46	0xD44	0xD42	0xD40
INT2.y	Reserved	EPWM7_TZINT	EPWM6_TZINT	EPWM5_TZINT	EPWM4_TZINT	EPWM3_TZINT	EPWM2_TZINT	EPWM1_TZINT
	–	(ePWM7)	(ePWM6)	(ePWM5)	(ePWM4)	(ePWM3)	(ePWM2)	(ePWM1)
	0xD5E	0xD5C	0xD5A	0xD58	0xD56	0xD54	0xD52	0xD50
INT3.y	Reserved	EPWM7_INT	EPWM6_ INT	EPWM5_INT	EPWM4_INT	EPWM3_INT	EPWM2_INT	EPWM1_INT
	-	(EPWM7)	(ePWM6)	(ePWM5)	(ePWM4)	(ePWM3)	(ePWM2)	(ePWM1)
	0xD6E	0xD6C	0xD6A	0xD68	0xD66	0xD64	0xD62	0xD60