Электромобильдерге арналған микроконтроллер жүйелерін бағдарламалау

Дәуренов ӘД

Дәріс №7. PWM және электромобильдің атқарушы құрылғыларын басқару

1. Дәрістің мақсаты

Студенттерге

- PWM сигналын қалыптастыру принципін,
- оның жиілігі мен толтыру коэффициентін,
- аппараттық таймерлер арқылы PWM генерациясын және
- электромобильдің атқарушы құрылғыларын басқаруда қолданылуын түсіндіру.

Оқыту нәтижелері:

- студент PWM сигналының негізгі параметрлерін есептейді,
- Timer мен PWM арасындағы байланысты түсіндіреді,
- салқындату желдеткіші мен сорғыны басқару принциптерін сипаттайды,
- Complementary PWM және Dead Time ұғымдарын ажыратады.

Атқарушы құрылғы дегеніміз не?

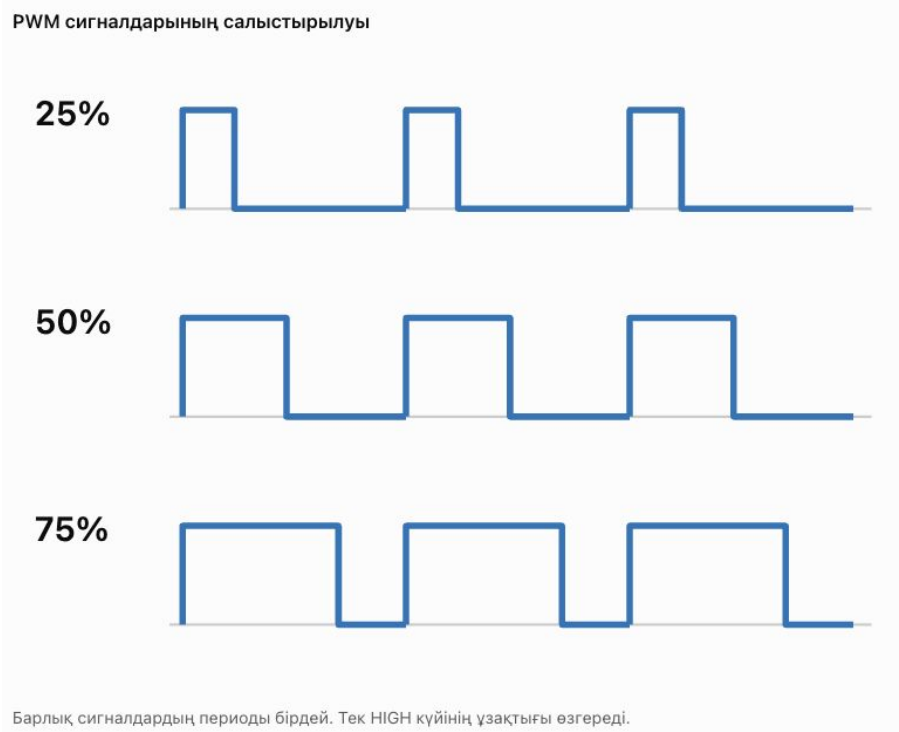
Атқарушы құрылғы (Actuator) — басқару жүйесінен алынған сигнал негізінде физикалық әрекет орындайтын құрылғы.

Электромобильде атқарушы құрылғылар қозғалысты, салқындатуды, жылытуды және басқа процестерді басқаруға қатысады.

Атқарушы құрылғы	Қызметі	Басқару мысалы
Cooling Fan	Ауа ағынын қалыптастыру	PWM арқылы жылдамдықты реттеу
Coolant Pump	Салқындатқыш сұйықтықты айналдыру	Жылдамдықты басқару
Valve Actuator	Сұйықтық немесе ауа ағынын өзгерту	Электрлік басқару сигналы
Heater Controller	Жылыту қуатын басқару	Арнайы қуат контроллері
Motor Inverter	Электр қозғалтқышына берілетін қуатты басқару	Күштік транзисторларды PWM арқылы басқару

Барлық атқарушы құрылғылар PWM-ді тікелей қабылдамайды. Кейбір құрылғылар CAN, LIN немесе басқа интерфейстер арқылы басқару командаларын алады.

PWM дегеніміз не?



PWM (Pulse Width Modulation) — импульс енін модуляциялау.
PWM — цифрлық сигналдың HIGH және LOW күйлерінің ұзақтығын өзгерту арқылы басқару әсерін қалыптастыру әдісі.
Мысалы, 3,3 В цифрлық шығыс бірде HIGH, бірде LOW күйіне ауысады. PWM сигналында осы күйлердің уақыттық қатынасы өзгертіледі.

PWM-дің маңызды ерекшелігі: сигналдың жоғары деңгейдегі кернеуі өзгермейді, оның HIGH күйінде болу уақыты өзгереді.

PWM сигналының негізгі параметрлері

$$f = \frac{1}{T}$$

PWM екі негізгі параметрмен сипатталады:

- Frequency (жиілік) — сигналдың бір секундта қанша п
- Duty Cycle (толтыру коэффициенті) — бір период ішін

$$D = \frac{T_{ON}}{T} \times 100\%$$

сі.

Мұнда:

f — жиілік, Гц;
T — период, секунд;
T_{ON} — HIGH күйінің ұзақтығы;
D — толтыру коэффициенті, %.

Есептеу мысалы

PWM периоды 10 мс, HIGH күйінің ұзақтығы 4 мс.

$$D = \frac{4}{10} \times 100\% = 40\%$$

$$f = \frac{1}{0.01} = 100 \text{ Гц}$$

Демек, PWM жиілігі 100 Гц, ал толтыру коэффициенті 40%.

6. PWM қалай атқарушы құрылғыны басқарады?

PWM (Pulse Width Modulation) — таймер шығаратын тіктөртбұрышты импульстардың ені (толтыру коэффициенті) арқылы атқарушы құрылғыға берілетін орташа қуатты реттеу тәсілі. Мысалы, желдеткіштің жылдамдығын осылай басқарамыз.

1 Температура датчигі

Аккумулятор немесе процессор температурасы өлшенеді.

Температура:
70 °C

2 STM32 — CPU + Timer

CPU температураны өңдеп, PWM толтыру коэффициентін (қажетті желдеткіш жылдамдығын) есептейді.



Мысал:
Температура = **70** °C
PWM = 70%

3 Желдеткіш драйвері

PWM сигналы драйверге беріледі. Драйвер электр қозғалтқышына берілетін кернеуді (орташа қуатты) реттейді.



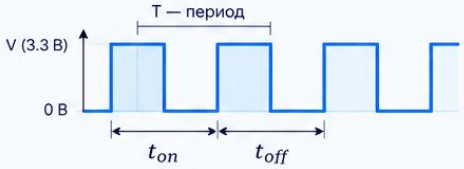
4 Желдеткіш (атқарушы құрылғы)

Драйвер қозғалтқышқа берілетін энергияны реттейді. PWM толтыру коэффициенті артқан сайын желдеткіш жылдамдығы өседі.



PWM сигналының жұмысы

PWM — бұл амплитудасы тұрақты, бірақ ені өзгеретін тіктөртбұрышты импульстар. Толтыру коэффициенті (Duty Cycle) желдеткішке берілетін орташа қуатты анықтайды.



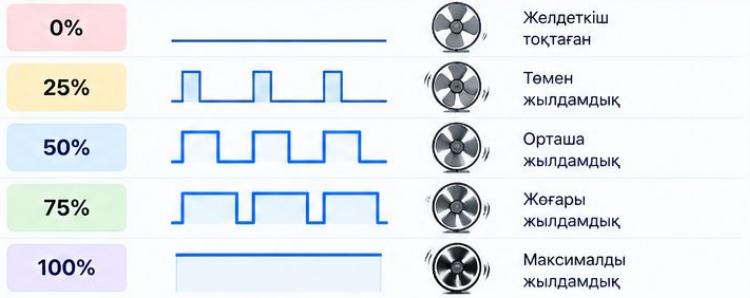
Толтыру коэффициенті:

$$D = \frac{t_{on}}{T} \times 100\%$$

Желдеткішке берілетін орташа кернеу:

$$V_{avg} = D \times V_{in}$$

Әртүрлі PWM мәндері және желдеткіш жылдамдығы



Нақты мысал (температураға байланысты басқару)

Температура (°C)	PWM (%)	Желдеткіш жылдамдығы
< 40	0	Тоқтайды
40 – 60	30	Төмен
60 – 80	70	Орташа
> 80	100	Максималды

Қорытынды

1. Таймер PWM сигналын шығарады (CCR регистрі арқылы).
2. Толтыру коэффициенті желдеткішке берілетін орташа қуатты анықтайды.
3. Осылайша, STM32 GPIO пині арқылы желдеткіштің жылдамдығы дәл және тиімді басқарылады.

10. PWM және күштік электроника

Электромобильде PWM тек желдеткішті басқару үшін ғана емес, сонымен қатар инвертордың күштік транзисторларымен электр қозғалтқышын басқаруда да қолданылады. Инвертор аккумулятордан алынған тұрақты токты (DC) үш фазалы айнымалы токқа (AC) түрлендіреді. PWM арқылы транзисторлар коммутацияланып, моторға қажетті кернеу мен ток беріледі.

1. HV Battery (Жоғары кернеулі АКБ)



Тұрақты ток көзі (DC)

Мысалы: 300–800 В DC

DC (тұрақты ток)

2. Power Inverter (Инвертор)



Күштік транзисторлар (IGBT/MOSFET) және драйверлер

DC → 3 фазалы AC (PWM арқылы)

3 фазалы AC (айнымалы ток)

3. Electric Motor (Электр қозғалтқышы)



Үш фазалы айнымалы токпен жұмыс істейді

Айнымалы кернеу мен жиілік арқылы жылдамдығы реттеледі

PWM сигналдары

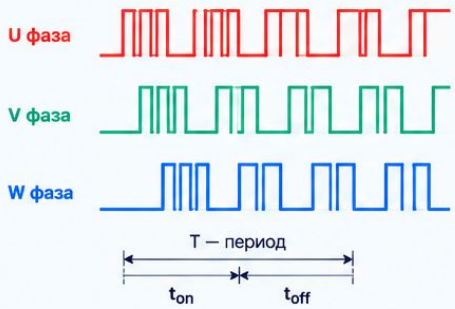
4. Inverter Controller (MCU)



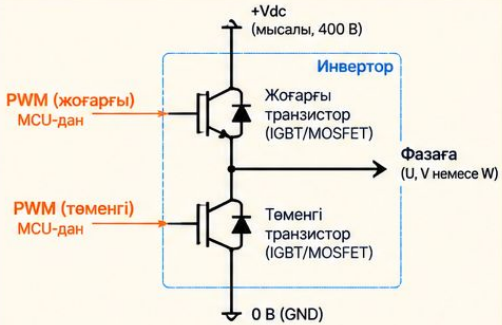
PWM басқару сигналдарын қалыптастырады

Инвертор транзисторларының gate-драйверлеріне PWM сигналдарын береді

PWM сигналдарының мысалы



Инвертордың күштік сұлбасы (бір фаза)



PWM арқылы моторды басқару

Толтыру коэффициенті (Duty Cycle)

10%	50%	90%
Төмен кернеу (баяу айналу)	Орташа кернеу (орташа айналу)	Жоғары кернеу (жылдам айналу)

Жиілікті өзгерту

Төмен жиілік	Жоғары жиілік
(жоғары айналу моменті)	(жұмсақ жұмыс, аз шу)

Үш фазалы басқару



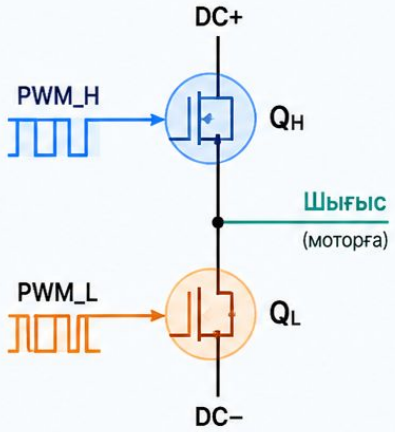
Қорытынды

1. PWM инвертордың күштік транзисторларын басқару үшін қолданылады.
2. Инвертор тұрақты токты үш фазалы айнымалы токқа түрлендіреді.
3. Толтыру коэффициенті мен жиілік мотор жылдамдығы мен айналу моментін реттейді.

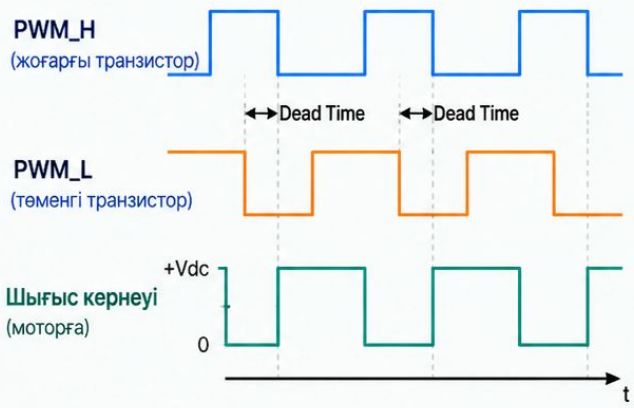
11. Complementary PWM — комплементарлық PWM

Complementary PWM — бір қуатты тармақтың жоғары (High-Side) және төменгі (Low-Side) транзисторларын басқаруға арналған **өзара үйлестірілген сигналдар.**
Бұл тәсіл жартылай көпір (Half-Bridge) немесе толық көпір (Full-Bridge) құрылғыларында қолданылады.

1 Жартылай көпірдің сұлбасы



2 Complementary PWM сигналдары



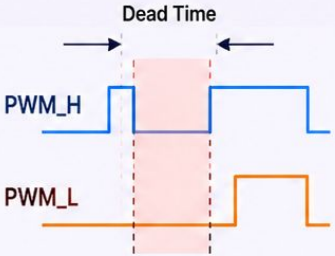
3 Жұмыс режимдері

PWM_H	PWM_L	Шығыс күйі
1	0	DC+ (жоғары)
0	1	DC– (төмен)
0	0	Жоғары кедергі (Hi-Z, мотор еркін жүріс)
1	1	**Қауіпті! (қысқа тұйықталу) — қолданылмайды**

4 Неліктен Dead Time қажет?

Жоғарғы және төменгі транзисторлар бір уақытта толық ашылып кетуі мүмкін. Бұл DC+ және DC– арасында қысқа тұйықталуға **(Shoot-Through)** әкеледі.

Сондықтап PWM сигналдары арасында қысқа кідіріс (Dead Time) енгізіледі.



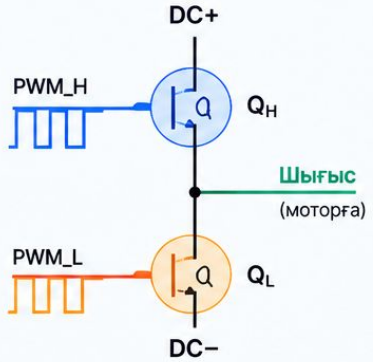
5 Қолданылуы

- BLDC және үш фазалы моторларды басқару (инверторларда).
- Жартылай көпір және толық көпір драйверлерінде.
- STM32 таймерлерінде Complementary PWM режимі және Dead Time генераторы қолданылады (TIM1, TIM8).

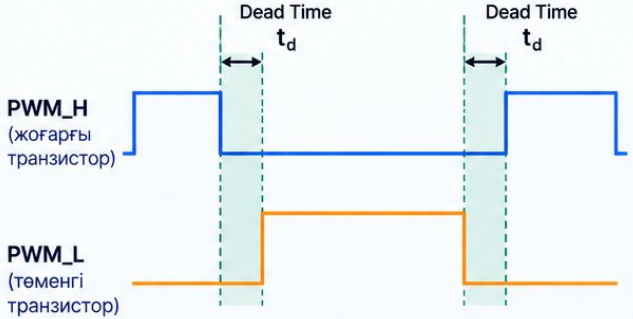
12. Dead Time — өлі уақыт

Dead Time — бір транзистор өшірілгеннен кейін екіншісі қосылғанға дейін әдейі енгізілетін қысқа уақыт аралығы.
Бұл уақыт аралығы жоғары және төменгі транзисторлардың бір уақытта өткізгіш болып кетуін (қысқа тұйықталу, Shoot-Through) болдырмайды.

1 Жартылай көпір (Half-Bridge)



2 Complementary PWM және Dead Time



3 Dead Time не үшін қажет?

Қысқа тұйықталуды (Shoot-Through) болдырмайды
Екі транзистор бір уақытта ашылып кетпеуі үшін.

Транзисторларды қорғайды
Жоғары ток пен қызып кетудің алдын алады.

Сенімді жұмысты қамтамасыз етеді
Инвертор мен мотордың тұрақты жұмыс істеуіне мүмкіндік береді.

4 Dead Time параметрі

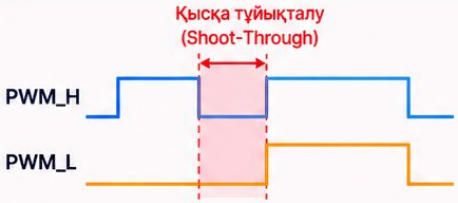
Dead Time мәні транзисторлардың сипаттамаларына, gate-driver құрылғысына, коммутация уақытына және жүйенің электрлік параметрлеріне байланысты таңдалады.

Жиі қолданылатын мәндер:

- **MOSFET** (жылдам): 100 – 500 нс
- **IGBT** (баяуырақ): 500 нс – 2 мкс

Мысал:
Егер транзисторды өшіру уақыты 200 нс болса, Dead Time мәнін 300 – 500 нс етіп қою жеткілікті.

5 Dead Time жоқ жағдай (қауіпті)



Егер Dead Time енгізілмесе, екі транзистор бір уақытта ашылып, DC+ және DC− арасында тікелей қысқа тұйықталу пайда болуы мүмкін. Бұл үлкен токқа, транзисторлардың істен шығуына және жүйенің зақымдалуына әкеледі.

6 STM32 таймерлері

STM32F103 микроконтроллерінде **TIM1** — **Advanced-Control Timer**, ол Complementary PWM және Dead Time мүмкіндіктерін қолдайды.

Ал **TIM2, TIM3 және TIM4** — жалпы мақсаттағы таймерлер, олардың Complementary PWM және Dead Time мүмкіндіктері жоқ.

TIM1 мүмкіндіктері:

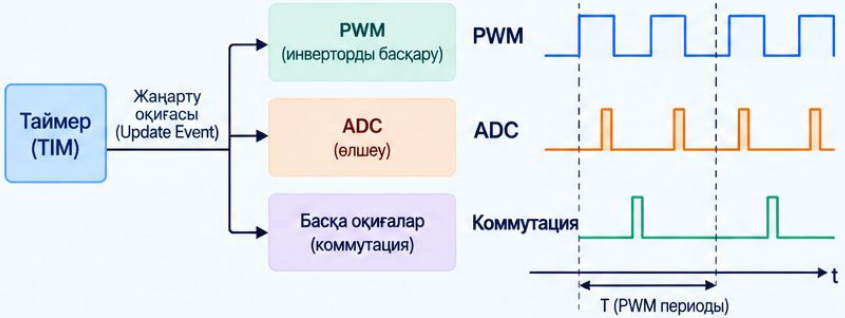
- Complementary PWM (PWM_H және PWM_L)
- Dead Time генераторы
- Break input (қорғаныс)
- Мотор басқаруға арналған арнайы режимдер

13. Синхронды және асинхронды байланыс

Қуаттық электроникада басқару сигналдарын негізгі басқару циклімен синхронды немесе асинхронды түрде қолдануға болады. Әр тәсілдің өз артықшылықтары мен қолдану жағдайлары бар.

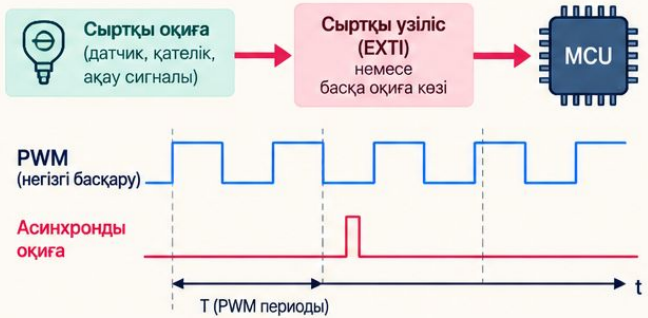
1 Синхронды басқару

Бірнеше оқиға немесе басқару сигналы ортақ уақыттық негізге сәйкес үйлестіріледі.



2 Асинхронды оқиға

Негізгі басқару цикліне тәуелсіз уақытта пайда болатын оқиға. Ол кез келген мезетте келуі мүмкін (мысалы, сыртқы үзіліс).



Синхронды және асинхронды басқарудың салыстырмасы

Сипаттама	Синхронды басқару	Асинхронды оқиға
Уақыттық негіз	Ортақ (таймер, PWM периоды)	Тәуелсіз (кез келген мезетте)
Мысал	PWM, ADC өлшеу, коммутация	Ақау сигналы, сыртқы үзіліс
Жұмыс режимі	Белгілі уақыттық байланыс	Күтпеген уақытта пайда болады
Негізгі мақсат	Деректерді үйлестіру, өлшеу дәлдігін арттыру	Сыртқы оқиғаларға жедел әрекет ету
Қолдану орны	Инвертор, моторды басқару, өлшеу жүйелері	Қорғаныс, авариялық тоқтату, сыртқы датчиктер

Нақты мысал: инвертордағы синхронды өлшеу



Қорытынды

Синхронды басқару — өлшеу мен басқару сигналдарының дәл және үйлесімді жұмысын қамтамасыз етеді. Асинхронды оқиғалар — күтпеген жағдайларда жедел әрекет ету үшін қолданылады. Күштік электроникада екі тәсілді дұрыс біріктіру сенімді және қауіпсіз жұмысты қамтамасыз етеді.

14. Электромобильдегі толық басқару мысалы

Мысал: аккумулятор температурасы көтерілген кезде салқындату жүйесін басқару. Микроконтроллер температураны өлшеп, PWM арқылы желдеткіштің жылдамдығын реттейді.

1 Температура датчигі

Аккумулятордың температурасын өлшейді (мысалы, NTC терморезистор).



Температура: 25–100 °C

2 ADC өлшеу

Аналогтық сигналды цифрлық мәнге түрлендіреді.

ADC

Мысал:
0–3.3 В → 0–4095
(12 бит)

3 CPU — алгоритм

Температураны талдап, PWM коэффициентін есептейді.



Мысал:
T < 40 °C → 0%
40–60 °C → 30%
60–80 °C → 70%
> 80 °C → 100%

4 Таймер — PWM

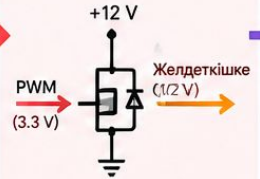
Аппараттық таймер басқару импульстарын қалыптастырады (TIM1, TIM2, ...).



PWM жиілігі: 20 кГц
Толтыру коэффициенті: 0–100%

5 Желдеткіш драйвері

PWM сигналын қуатты басқару сигналына түрлендіреді.



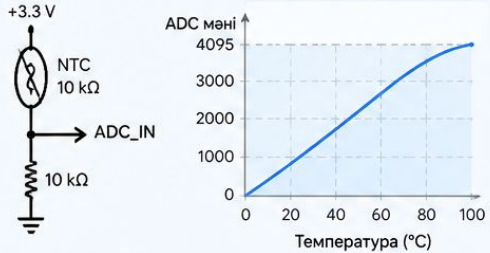
6 Салқындату желдеткіші

Желдеткіш PWM сигналына сәйкес жылдамдықпен жұмыс істейді.



Жылдамдық: 0 – 100%

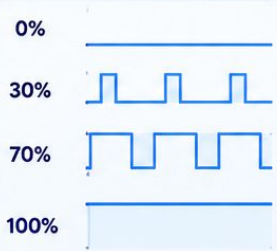
1. Датчик пен ADC өлшеуі



2. Басқару алгоритмі

Температура (°C)	PWM (%)
< 40	0
40 – 60	30
60 – 80	70
> 80	100

3. PWM сигналы



4. Желдеткіш жылдамдығы



Қорытынды: алгоритмнің жұмыс тәртібі

1. Температура датчигі аккумулятордың температурасын өлшейді.
2. ADC аналогтық сигналды цифрлық мәнге түрлендіреді.
3. CPU температураны талдап, PWM коэффициентін есептейді.
4. Аппараттық таймер PWM сигналын қалыптастырады.
5. Драйвер желдеткішке қажетті қуатты береді.
6. Желдеткіш есептелген жылдамдықпен жұмыс істейді.

PWM-ді қолданудағы маңызды шектеулер

PWM — әмбебап басқару әдісі болғанымен, нақты құрылғыны басқару кезінде оның техникалық сипаттамаларын ескеру қажет.

Мысалы, жиілік тым төмен болса, кейбір қозғалтқыштарда діріл немесе акустикалық шу пайда болуы мүмкін. Жиілік тым жоғары болса, күштік транзисторлардың коммутациялық шығындары артуы мүмкін.

Сонымен қатар желдеткіштің ең төменгі іске қосылу жылдамдығы, ток шектеуі, температуралық қорғаныс және драйвердің қолдайтын PWM диапазоны тексеріледі. Электромобильдің тартқыш инверторын басқару салқындату желдеткішіне PWM беруден әлдеқайда күрделі. Ол үш фазалы коммутацияны, ток пен кернеуді өлшеуді, басқару алгоритмдерін және аппараттық қорғанысты талап етеді.

PWM — микроконтроллердің атқарушы құрылғыларды басқаруда кеңінен қолданылатын әдістерінің бірі. Оның негізгі параметрлері — жиілік пен толтыру коэффициенті. STM32 аппараттық таймерлері PWM сигналдарын CPU-дың әр импульсті бағдарламалық түрде ауыстыруынсыз қалыптастыра алады.

Электромобильде PWM салқындату құрылғыларының драйверлерінде, қуатты реттеу жүйелерінде және тартқыш инверторларда қолданылады. Күштік электроникада Complementary PWM, Dead Time және аппараттық қорғаныс ерекше маңызды.

Бақылау сұрақтары

1. PWM дегеніміз не?
2. Frequency және Duty Cycle айырмашылығы қандай?
3. PWM толтыру коэффициенті қалай есептеледі?
4. PWM сигналының HIGH деңгейіндегі кернеу мен орташа мәні қалай ерекшеленеді?
5. STM32-де PWM қалыптастыру үшін қандай модуль қолданылады?
6. PSC, ARR, CCR регистрлерінің қызметі қандай?
7. Желдеткішті басқару үшін неге драйвер қажет?
8. Complementary PWM дегеніміз не?
9. Shoot-Through қандай жағдайда пайда болады?
10. Dead Time не үшін енгізіледі?
11. PWM мен ADC өлшеулерін синхрондау неге пайдалы?
12. Салқындату желдеткішін басқару мен тартқыш инверторды басқарудың айырмашылығы қандай?