

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання**

## **ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

з навчальної дисципліни  
«Мікроконтролерні пристрої електромеханічних систем»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми першого(бакалаврського) рівня вищої освіти

***141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(Електромеханіка)***

**за темою № 5 – Реалізація мікроконтролерних систем керування  
електроприводами**

**Кременчук 2023**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1.

**Розробник:** викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Волканін Є.Є.

**Рецензенти:**

1. Доцент кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», к.т.н. Шокарьов Д.А.
2. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання КЛК ХНУВС, к.т.н., професор Гаврилюк Ю.М.

### **План лекції:**

1. Керування двофазним безколекторним електродвигуном постійного струму без датчиків.
2. Керування асинхронним електродвигуном змінного струму за принципом постійності  $V/f$  і звичайного ШІМ-керування.

### **Рекомендована література:**

#### **Основна:**

1. Грищук Ю.С. Мікропроцесорні пристрої: Навчальний посібник. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – 280с.
2. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки: навч. посіб. / В. Ф. Болюх, В. Г. Данько, Є. В. Гончаров; за ред. В. Г. Данька; НТУ «ХП». – Харків: Планета-Прінт, 2019. – 248 с.

#### **Допоміжна:**

1. Мікроконтролерні пристрої: навч. посіб. для студ. спец. «Мікро- та наноелектроніка» / О. С. Тонкошкур, І. В. Гомілко, О. В. Коваленко; Дніпропетровський нац. ун-т ім. О. Гончара. – Д.: Вид-во ДНУ, 2011. – 264 с.
2. Мікропроцесорні пристрої: Методичні вказівки до виконання курсової роботи./ Ю.М.Трофімов К.: [ДЕТУТ],2007.-191с.
3. Електронні системи: навчальний посібник / Й. Й. Білінський, К. В. Огороднік, М. Й. Юкиш. — Вінниця: ВНТУ, 2011. — 208 с.

#### **Інформаційні ресурси в Інтернеті:**

1. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Мікроконтролер>
2. [http://elprivod.nmu.org.ua/ua/interesting/what\\_is\\_mp\\_mc\\_plc.php](http://elprivod.nmu.org.ua/ua/interesting/what_is_mp_mc_plc.php)
3. <http://vozom.ho.ua/MP/page61.html>
4. <https://life-prog.ru/ukr/arhitektura.php>

### **Текст лекції**

#### **1. Керування двофазним безколекторним електродвигуном постійного струму без датчиків**

Двофазні безколекторні електродвигуни постійного струму (БКЕПС) широко використовуються у вентиляторах для вентиляції і охолодження ЦПУ, графічних процесорів, джерел живлення і мають безліч інших застосувань. В порівнянні з колекторними двигунами БКЕПС відрізняються легшою вагою, швидким розгоном, випромінюванням меншого рівня електричних і акустичних шумів, а також не потребують технічного обслуговування (усунутий знос колекторного вузла). Вимоги до охолоджувальних вентиляторів неперервно збільшуються, оскільки зростає число електроніки з великим тепловиділенням. У зв'язку із збільшенням об'ємів застосування вентиляторів з'являється необхідність в недорогих рішеннях, що дозволяють зберегти на низькому рівні вартість кінцевої продукції. Крім того, оскільки росте число використовуваних вентиляторів в побутовій і офісній електроніці, то вентилятори повинні бути якомога

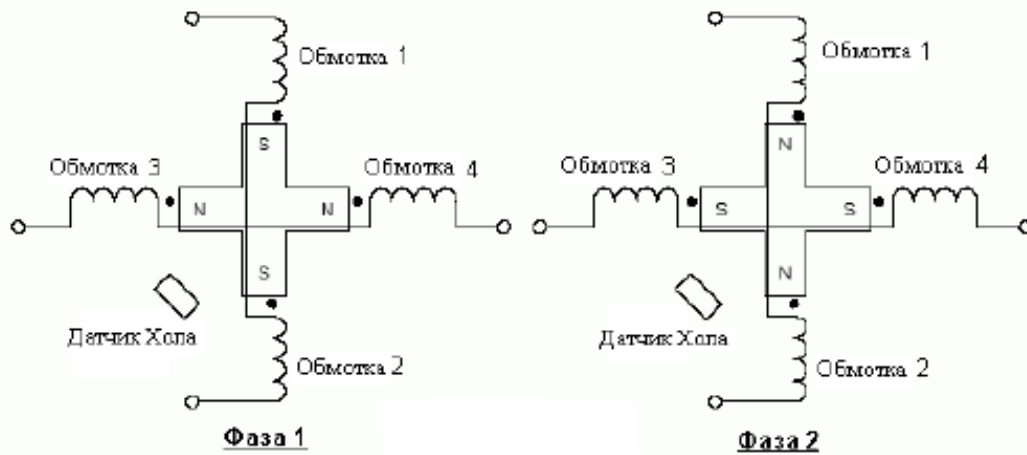
тихішими і економічнішими. Характеристики БКЕПС достатньо повно відповідають вимогам вентиляторів.

Тут описується, як реалізувати схему і програму для керування двофазним БКЕПС на основі 8-розрядного мікроконтролера AVR [20]. Для реалізації функцій керування використовується недорогий і мініатюрний мікроконтролер ATtiny13. АЦП і ШІМ використовуються таким чином, що не потрібні датчики Холла; для визначення необхідності перемикання струмів, статорів, мікроконтролер оцінює рівень ЕРС на пасивній обмотці. Дане рішення дозволяє вилучити датчик Хола (датчик положення) і є сучасним, недорогим методом керування двофазним БКЕПС.

**Двофазний БКЕПС.** Безколекторні електродвигуни постійного струму складаються з ротора з постійними магнітами і статора з декількома обмотками. Кількість полюсів на постійних магнітах і кількість обмоток, статорів, варіюється залежно від бажаних характеристик двигуна. Звичайний двофазний електродвигун показаний на рис. 1. На рисунку поданий двигун з 4 обмотками і 2 наборами полюсів. Верхня і нижня обмотки з'єднані послідовно, точно так з'єднані ліва і права обмотки.

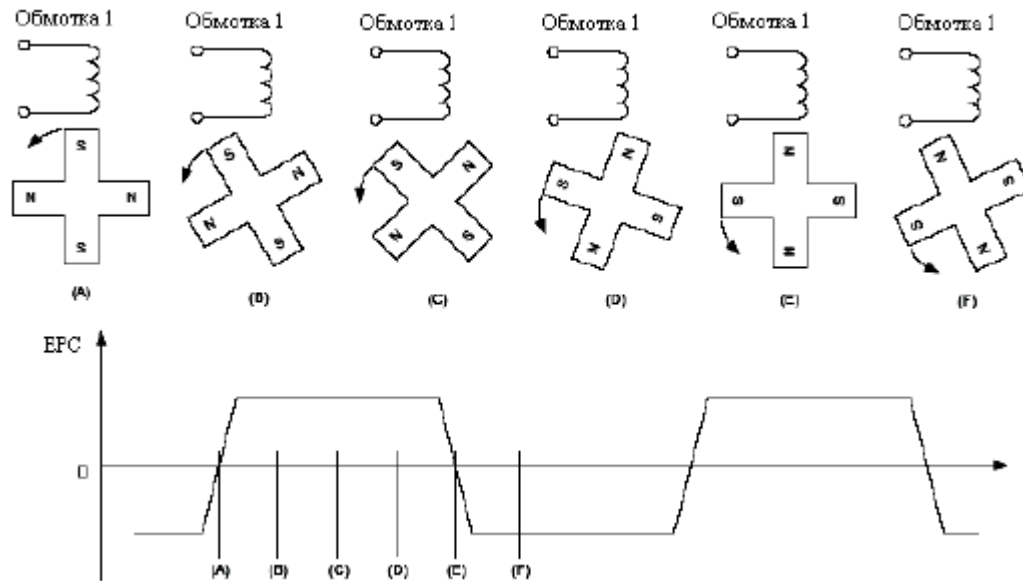
Уточнимо термінологію щодо комутації електродвигуна. Пасивна або неживильна обмотка - обмотка, яка генерує магнітне поле, що обертає ротор (оскільки через цю обмотку не протікає струм). У протилежність цьому, активна або живляча обмотка - обмотка, через яку протікає електричний струм, що створює магнітне поле. У нормальному режимі роботи, у будь-який момент часу, одна обмотка є активною, а інша - пасивною. Від положення роторних магнітів залежить, яка обмотка повинна жити для обертання ротора в потрібному напрямі. В процесі роботи зміна положення ротора відбувається за рахунок зміни електричного струму через обмотки таким чином, що обертання підтримується за рахунок зміни магнітного поля статорів, яке генерується обмотками.

При живленні обмоток 1 і 2 на рис. 1 будуть притягуватися/відштовхуватися полюси роторних магнітів у напрямку до обмоток (фа-за 1). Як тільки почнеться обертання, інерцією ротора гарантуватиметься, що ротор не тільки притягнеться до активних обмоток, але і пройде повз них. Як тільки магніт пройде повз активних обмоток, повинні бути активізовані інші обмотки (фаза 2) і обертання, таким чином, продовжиться. Як-що перемикання виконати в потрібний момент, то магнітні поля обмоток зміняться таким чином, що сформований обертальний момент буде завжди в одному напрямі. Якщо ж перемикання обмоток виконати раніше або пізніше, то протягом короткого часу буде сформований обертальний момент в протилежному напрямі, уповільнюючи частоту обертання ротора. Таким чином, необхідна інформація про положення роторних магнітів відносно обмоток для досягнення максимальних робочих характеристик.



1 - Принцип дії двофазного БКЕПС

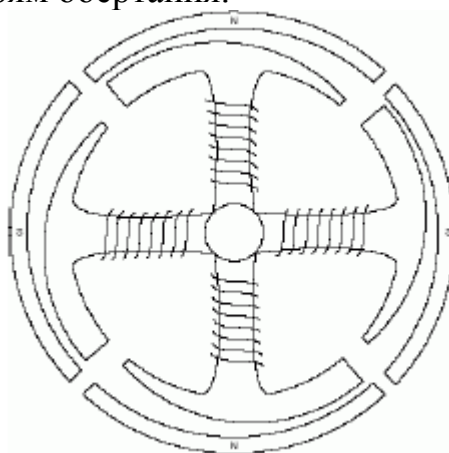
Процес комутації обмоток двофазного БКЕПС звичайно керується датчиком Холла, який використовується для визначення положення ротора. Датчик Холла - магнітний ключ, який дозволяє визначити положення магнітного поля, що в даному випадку генерується роторними магнітами. Датчик Холла встановлює на своєму виході логічний 0 або 1 залежно від полярності магнітного поля, що генерується роторними магнітами. Якщо датчик Холла розташувати між обмотками 2 і 3 (рис. 5.1), то він змінює стан свого виходу, коли роторні магніти збігаються з обмотками, тобто коли магнітні поля двох полюсів компенсують один одного і змінюється полярність магнітного притягання. Датчики Холла надають керуючій системі інформацію про те, коли необхідно виконати перемикання обмоток для підтримки обертання. Недоліками використання даного способу керування комутацією є дорожнеча датчика Холла і необхідність точного позиціонування датчика для отримання надійної інформації. Навіть при точному по-зиціонуванні датчика Холла інформація про положення поступає тільки миттєво при кожному перемиканні. Електрорушійна сила. Електрорушійна сила (ЕРС) - напруга на ін-дуктивності (обмотці), що генерується змінним магнітним полем (створене магнітами при обертанні ротора). Форма ЕРС у БКЕПС приблизно трапе-цієподібна, як показано на рис. 2.



2 - EPC, індукована при обертанні роторних магнітів

EPC робить суттєвий вплив на роботу БКЕПС. EPC генерується на обмотках, статорів, під час обертання ротора. Амплітуда EPC прямо пропорційна швидкості зміни магнітного поля (з боку обмотки) - іншими словами, амплітуда EPC пропорційна частоті обертання електродвигуна. Коли електродвигун досягне заданої швидкості, амплітуда EPC буде рівна напрузі, використовуваній для живлення обмоток. Це обмежує електричний струм через обмотку і, отже, частоту обертання, оскільки струм потрібен для генерації магнітного поля, а магнітне поле необхідне для створення обертального моменту. EPC, індукована в живильній обмотці, називається зворотною EPC. EPC генерується не тільки в живильній обмотці, але також і в пасивній. EPC пасивної обмотки можна виміряти і використати для визначення положення ротора. На рис. 2 ілюструється трапецієподібна EPC, індукована в пасивній обмотці, у функції положення (кута) роторного магніту. Недоліком використання EPC для визначення положення ротора є залежність амплітуди EPC від частоти обертання, що вимагає вимірювання нижчих рівнів напруги. При цьому також необхідно врахувати вплив шумів, які можуть бути присутніми в заданій системі. Як показано на рис. 2 EPC змінює полярність, коли роторний магніт знаходиться на одній лінії з обмоткою, в цей же момент повинен змінитися стан на виході датчика Холла. Дана особливість використовується при використанні способу керування БКЕПС без датчиків. Керування БКЕПС без датчиків. Спосіб керування без датчиків з використанням EPC, як правило, застосовується для керування трифазним БКЕПС. У даній реалізації EPC використовується для визначення положення ротора і, таким чином, для синхронізації процесу комутації. При обертанні роторних магнітів двофазного двигуна, за аналогією з трифазним двигуном, генерується EPC в пасивній обмотці статора. Ідея використання EPC пасивної обмотки для визначення положення ротора використовувалася при розробці пристрою, пропонуваного в даних рекомендаціях для

застосування. Основною перевагою комутації без датчиків є виключення датчика Холла. Напрямок обертання. У більшості застосувань необхідний тільки один свідомо відомий напрям обертання. Наприклад, при охолодженні джерела живлення персонального комп'ютера необхідно швидше подавати холодне повітря приміщення в джерело живлення, ніж, навпаки, всмоктувати гаряче повітря з джерела живлення усередину приміщення. Крім того, в більшості випадків лопаті вентилятора оптимізовані під один напрям обертання.



3 - Звужений повітряний зазор в двофазному електродвигуні

Конструкцією двигуна на рис. 1 не гарантується напрям обертання під час запуску електродвигуна. Напрямок залежить від початкового положення ротора і порядку активізації обмоток. Якщо початкове положення ротора відоме, то можна визначити порядок активізації обмоток, який приведе до обертання в потрібному напрямі. При керуванні без використання датчиків немає інформації про початкове положення ротора. Таким чином, перед запуском електродвигуна Рисунок 3 - Звужений повітряний зазор в двофазному електродвигуні ротор повинен бути переведений у певне положення. При активізації одного набору обмоток магніти ротора порівнюються з обмотками таким чином, що північні полюси магнітів стають напроти південних полюсів статора або навпаки. Активізуючи обмотки у такий спосіб, можна перевести ротор у певне положення. Проте знання положення ротора не достатньо для гарантування, що двигун обертатиметься в потрібному напрямі. Для обертання двигуна в потрібному напрямі потрібно передбачити спеціальну конструкцію магнітного сердечника. У багатьох двофазних БКЕПС коректність напрямку обертання гарантується звуженням повітряного зазора (рис. 3). Повітряний зазор між роторним магнітом і статором непостійний. Коли обмотки статорів не живлять, роторний магніт приймає положення, в якому повітряний зазор між полюсами магнітів і магнітного сердечника - найменший (тобто, де найменший магнітний опір). Двигун на рис. 3 має чотири такі положення спокою. Ці положення розташовані між положеннями збігу полюсів, які живлять послідовні обмотки. Якщо ротор порівнюється з набором обмоток (за рахунок

активізації обмотки), а потім обмотка знеструмлюється, то ротор продовжить обертання до найближчого положення спокою. Положення ротора, таким чином, відоме і далі напрям обертання керується шляхом вибору відповідного порядку комутації. Часові діаграми напруг в процесі комутації. Для того, щоб зрозуміти як ефективно керувати двигуном, необхідно уявити, як формується обертальний момент. Нижче подано вираз електричного моменту, що генерується однією фазою:

$$T_e = \frac{e \cdot i}{\omega},$$

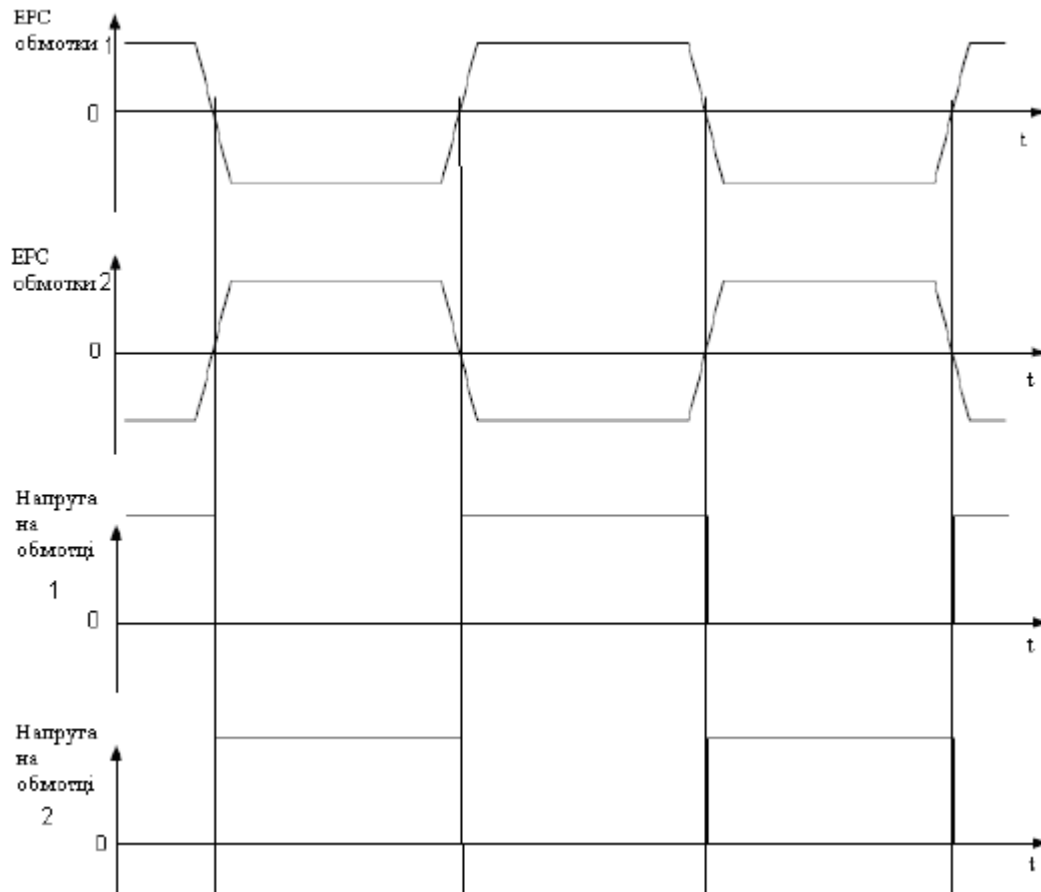
де  $T_e$  - електричний момент;

$e$  - ЕРС;  $i$  - струм через обмотки двигуна;

$\omega$  - кутова швидкість ротора.

Даний вираз показує, що сформований обертальний момент має той же напрям, що і обертання, якщо  $e$  і  $i$  мають однаковий знак. Або навпаки, якщо  $e$  і  $i$  мають протилежні знаки, то електрична енергія витрачається на уповільнення двигуна. У більшості вентиляторів використовується прямокутна форма на-пруг в процесі комутації (в цьому випадку комутація називається блоко-вою). На рис. 5.4 показана блокова комутація, де перемикання виконується при перетині нуля напругою ЕРС (зміна полярності) для підтримки рівності знака фазного струму і знака ЕРС. Керування швидкістю за допомогою широко-імпульсної модуляції. Як показано раніше, може виникнути необхідність керування частотою обертання двигуна. У вентиляторах також може виникнути необхідність зниження акустичних шумів і зниження споживаної потужності двигуна.

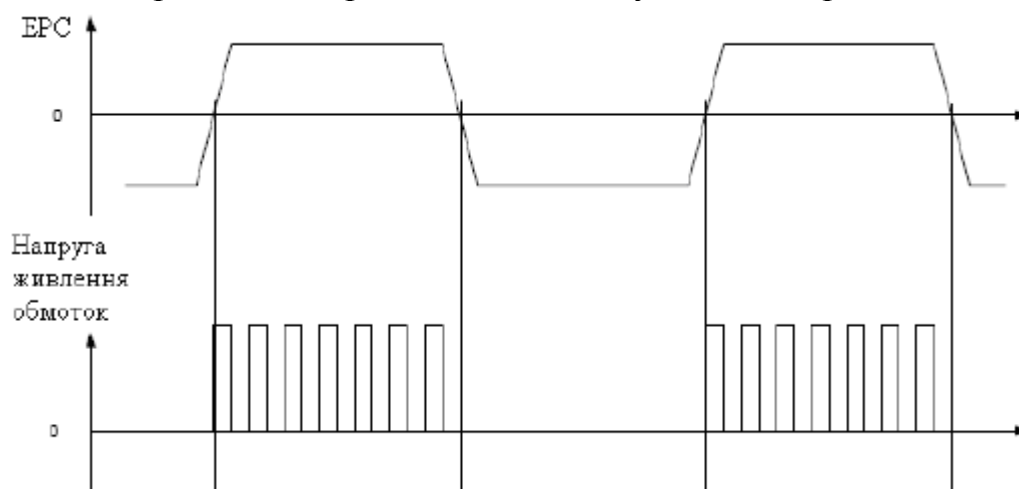




4 - Основні осцилограми напруг при комутації

Одним із способів керування частотою обертання двигуна є керування робочою напругою двигуна; проте, дуже небагато систем, в т.ч. ПК, можуть безпосередньо формувати регульовану напругу для живлення електродвигуна без спеціального апаратного каскаду живлення. В результаті до складу багатьох систем входить спеціальна схема, яка дозволяє регулювати напругу живлення вентилятора і привносить свою частину вартості в кінцеву вартість системи. Якщо ж врахувати, що електроніка вентилятора вже містить транзистори, які можуть використовуватися для керування напругою живлення двигуна, то додаткову схему для регулювання напруги живлення електродвигуна необхідно розглядати як надмірну. Таким чином, альтернативним рішенням для керування напругою /швидкістю є використання електроніки керуючого двигуна. Якщо для керування комутацією використовується мікроконтролер, то для керування середнім значенням напруги живлення обмоток можна використовувати широтноімпульсну модуляцію (ШІМ). Якщо пов'язати вихід ШІМ-генератора з обмотками електродвигуна, то можна керувати середнім значенням напруги і, отже, струмом через обмотки (рис. 5). Коефіцієнт заповнення імпульсів ШІМ-сигналу визначає середнє значення напруги живлення обмоток. На рис. 5 заповнення імпульсів 50%. Це означає, що середнє значення напруги, яка подається на обмотки, рівне 50% від початкової живильної напруги.

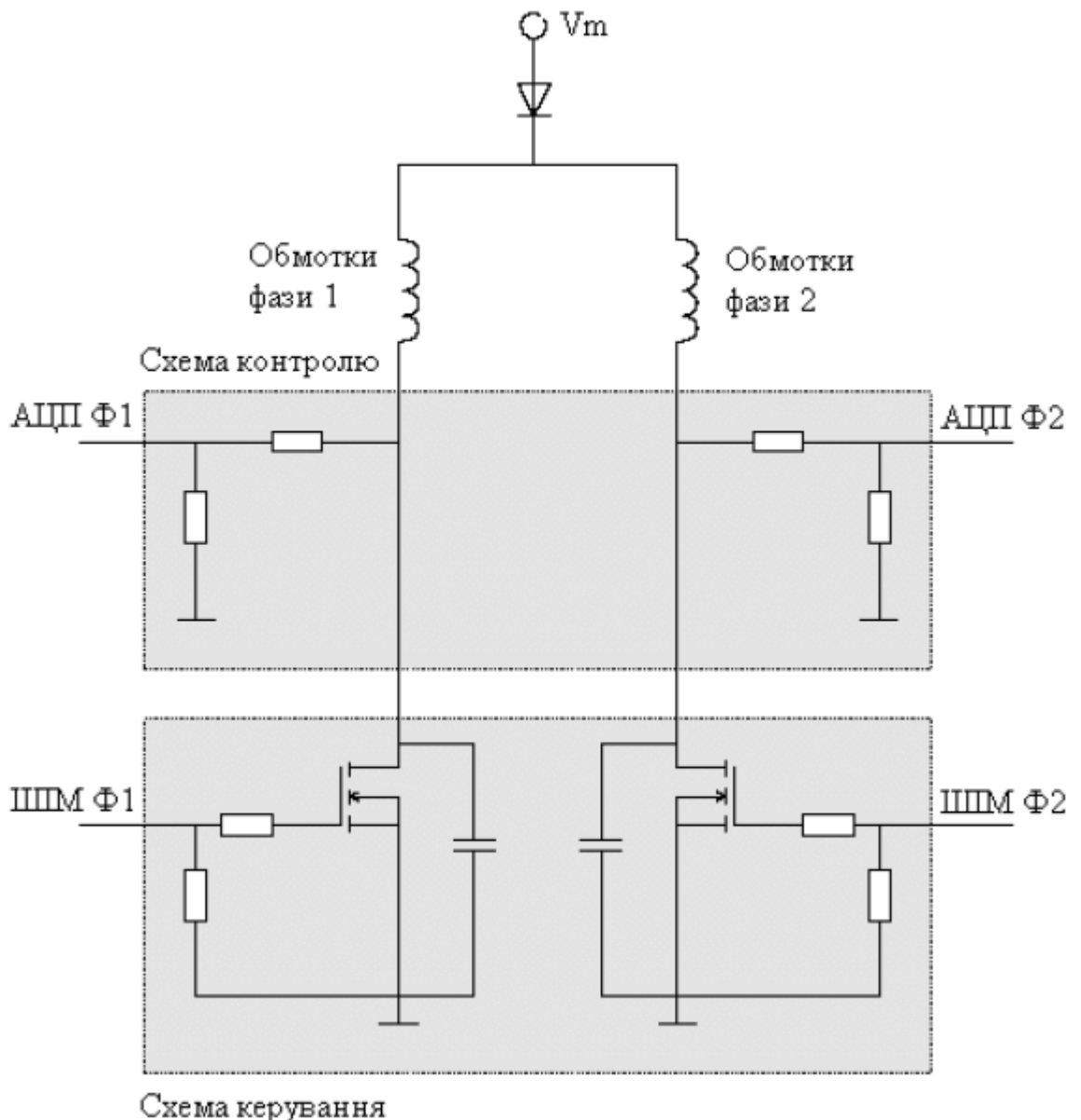
Збільшення заповнення імпульсів ШІМ-сигналу приводить до збільшення швидкості обертання і обертового моменту вентилятора.



5 - Напруга живлення обмоток двигуна з ШІМ

При використанні ШІМ-керування швидкістю бажано мати вбудований в мікроконтролер апаратний генератор ШІМ-сигналу. Використання апаратного ШІМ-генератора гарантує коректність часової діаграми без паразитних імпульсів, що робить можливим регулювання напруги (заповнення імпульсів) у всьому діапазоні від 0% до 100%. Апаратна генерація ШІМ-сигналу також дозволяє розвантажити процесор для виконання інших важливих завдань, як, наприклад, керування комутацією, функції захисту і стабілізація частоти обертання. Одна з основних вимог при використанні ШІМ-керування швидкістю обертання є розташування основної частоти ШІМ за межами діапазону чутності (20 Гц...20 кГц). Це означає, що бажано використовувати основну частоту ШІМ істотно вищу 20 кГц. При цьому також необхідно враховувати механічні характеристики вентилятора. Акустичний шум від невеликих вентиляторів часто нечутний, навіть якщо базова частота ШІМ нижче 20 кГц. Проте потрібно знати, що частоти ШІМ нижча 20 кГц, залежно від вентилятора, можуть бути чутні як високий тон. При використанні частот ШІМ вище 20 кГц необхідно враховувати, що із збільшенням основної частоти ШІМ збільшується розсіявана потужність на керуючих транзисторах. Задана частота обертання. Частота обертання двигуна в більшості застосувань регулюється за допомогою зовнішнього сигналу. Як останнє виступає аналоговий сигнал, сформований, наприклад, датчиком температури або потенціометром, або ШІМ-сигнал, сформований головним контролером системи. Використання мікроконтролера з вбудованим АЦП дозволяє оперувати з будь-яким типом зовнішнього сигналу для задання швидкості двигуна, а потім після визначення заданої швидкості варіювати заповнення імпульсів ШІМ-сигналу для керування напругою живлення обмоток. Таким чином, є можливість реалізувати керування частотою обертання із зворотним зв'язком, коли ШІМ-сигнал постійно змінюється для мінімізації різниці між заданою і фактичною частотою обертання. Апаратна частина. На рис. 6 подані основні апаратні

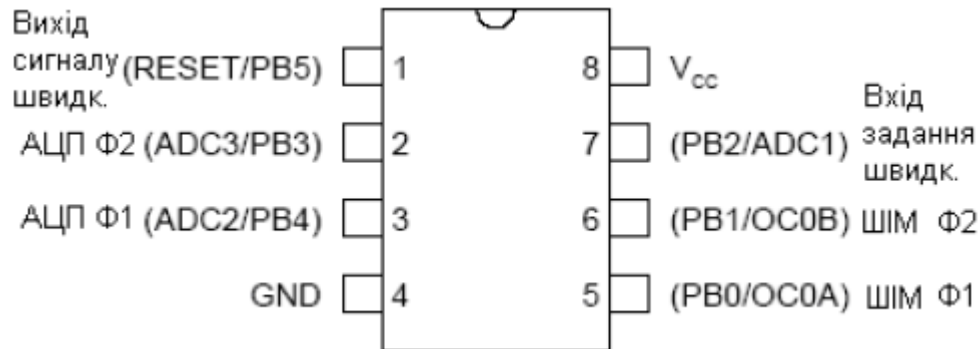
функціональні вузли, які необхідні для реалізації пристрою керування двофазним БКЕПС без датчиків на основі мікроконтролера. Принципова схема залишається однією і тією ж, незалежно від використовуваного типу електродвигуна, а при відомому типі електродвигуна необхідно уточнити тільки параметри елементів схеми. Вузол, позначений "Схема керування", як правило, має два ключі, які при ввімкненні роблять можливим протікання електричного струму через обмотки. Як ключі використовуються транзистори. Конденсатори паралельно транзисторам дозволяють згладити перехідні напруги, які виникають при розмиканні індуктивного навантаження, а також зменшують шуми, що виникають при комутації. Вузол, позначений "Схема контролю", виконує обробку сигналу. На рис. 6 для цього використовується тільки подільник напруги, що дозволяє погоджувати за напругою джерело сигналу з АЦП мікроконтролера. Зверніть увагу, що резистивні кола впливають на значення ЕРС. Якщо не виконувати ділення напруги, то вимірювана напруга буде рівна  $V_m - V_d - V_c$ , де  $V_d$  - спад напруги на діоді, а  $V_c$  - загальний спад напруги на обмотці. Спад напруги на обмотці рівний ЕРС неактивної обмотки. Вимірювання негативних рівнів ЕРС можливе, завдяки використовуваному розташуванню точок вимірювання ЕРС і резистивних вимірювальних кіл. В цьому випадку негативні рівні ЕРС накладаються на позитивний постійний зсув. Діод між напругою живлення і обмотками двигуна виконує функцію захисту від зміни полярності, а також гарантує непопадання напруги з боку двигуна в ланцюг живлення. Виводи, позначені "АЦП  $\Phi 1/2$ " і "ШІМ  $\Phi 1/2$ ", є під'єднаннями до мікроконтролера. Мікроконтролер. Як сказано вище, при керуванні двофазним БКЕПС без використання датчиків необхідно два канали АЦП для вимірювання ЕРС і два ШІМ-виходи для керування комутацією і швидкістю. Крім того, один канал АЦП потрібен, якщо необхідно зовнішнє задання швидкості. Якщо необхідно формувати інформацію про частоту обертання, то знадобиться додатковий вихід. Таким чином, всього потрібно 6 ліній введення-виведення.



6 - Драйвери і схема контролю при керуванні БКЕПС без датчиків

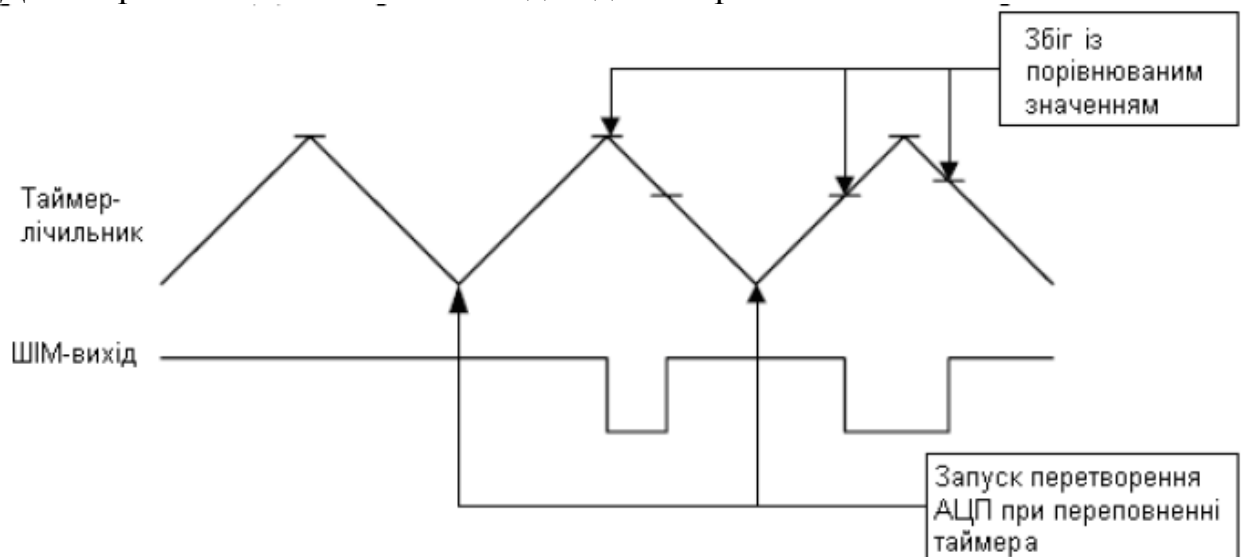
ATtiny13 - 8-вивідний мікроконтролер, здатний виконувати функції керування двофазним БКЕПС без датчиків з урахуванням опитування зовнішньої аналогової напруги уставки за швидкістю і формування сигналу з інформацією про частоту обертання. Вбудований АЦП, внутрішнє джерело опорної напруги, два канали ШПМ, а також калібрований RC-генератор, частотою 9.6МГц, зводять потреби в зовнішніх компонентах до мінімуму. Розподілення виводів мікроконтролера ATtiny13 подано на рис. 7. Зверніть увагу, що сигнал з інформацією про частоту обертання формується на виведенні сигналу скидання. Для дозволу роботи виведення скидання як лінію введення-виведення необхідно запрограмувати конфігураційний біт RSTDISBL (відключення скидання). Необхідно також врахувати, що, навіть якщо біт RSTDISBL запрограмований, скинути мікроконтролер можна, якщо подати на вхід скидання напругу вище за 10.5В. Якщо дана особливість використовуватиметься (тобто можлива подача високої напруги на виведення

скидання), то в сигнальному ланцюзі, пов'язаному з виведенням скидання, необхідно передбачити обмежувач напруги до рівня  $V_{cc}$ , наприклад, стабілітрон. При необхідності можна обміняти місцями виведення сигналу про вимірю швидкість і зовнішнє задавання за швидкістю. При вимірюванні за допомогою АЦП використовується внутрішнє джерело опорної напруги 1.1В. Всі сигнали на вході АЦП, таким чином, повинні змінюватися в межах 0-1.1В.



7 – Під'єднання до мікроконтролера ATtiny13

Регулювання напруги за допомогою ШІМ. Для керування напругою активної обмотки і, отже, швидкістю обертання двигуна, використовується два канали ШІМ. Виходи даних каналів пов'язані з транзисторами каскаду керування. Для реалізації ШІМ використовується двонаправлений таймер-лічильник. Таймер генерує три події: дві події збігу, при яких встановлюється або скидається відповідний вихід, і одне переривання при переповненні. Двонаправлена лічба і ШІМ-вихід подані на рис. 8.



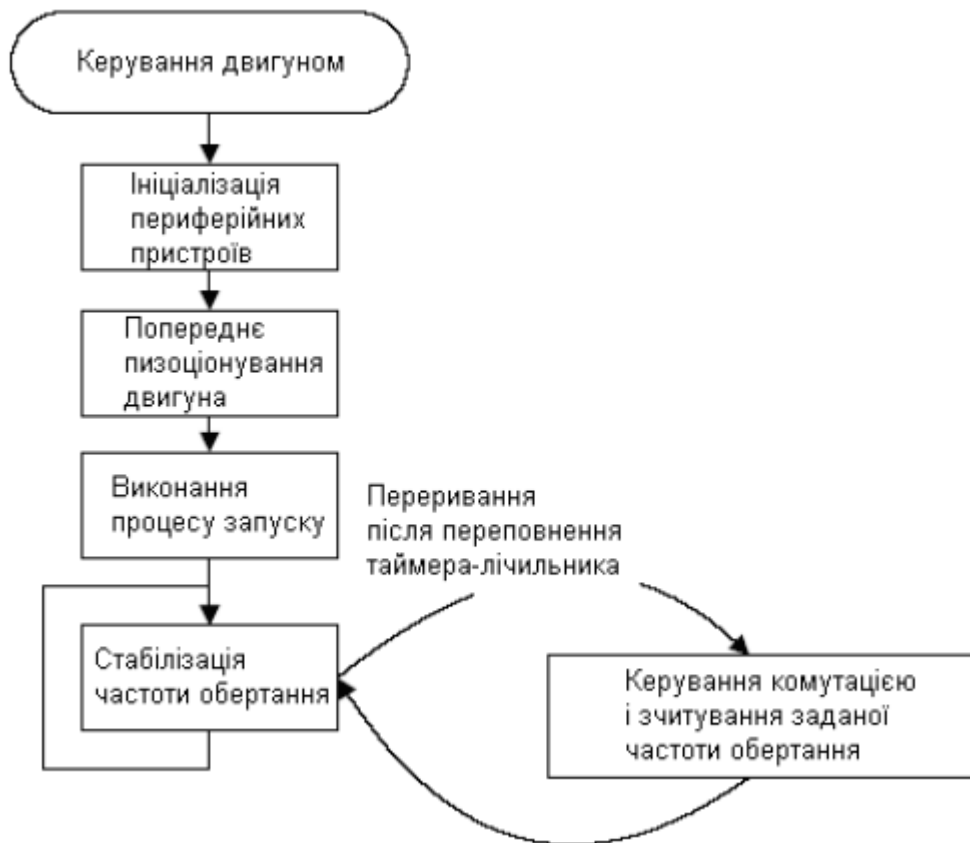
8 - ШІМ-вихід таймера-лічильника в режимі двонаправленої лічби

Основною причиною використання двонаправленого режиму лічби таймера є можливість запуску перетворення АЦП при переповненні таймера, тобто коли комутаційні шуми не накладаються на сигнал ЕРС. При виникненні переривання після переповнення таймера також запускається процедура обробки переривання, в якій оцінюється положення ротора і виконується

комутація, якщо для цього є необхідні умови (тоб-то, коли ЕРС, зміряне АЦП, перетинає заданий поріг). Основна частота ШІМ повинна бути близькою до 20 кГц, щоб вийти за межі чутливості. Якщо таймер працює від внутрішнього RC-генератора частотою 9.6 МГц і використовується двонаправлений режим лічби, то для отримання частоти 20 кГц необхідно як вершину лічби використовувати значення 240 ( $9.6 \text{ МГц} / 20 \text{ кГц} / 2$ ). Проте при використанні двох каналів порівняння мікроконтролера ATtiny13 немає можливості змінити вершину рахунку і в цьому випадку як вершина лічби виступає значення за замовчуванням 255. В цьому випадку базова частота ШІМ буде рівна 18.85 кГц, що цілком прийнятно в більшості вентиляторів. Якщо використовуваний вентилятор створює акустичний шум на частотах до 20 кГц, то необхідно варіювати частотою RC-генератора. При збільшенні частоти внутрішнього RC-генератора також збільшуватиметься і основна частота ШІМ. Частота внутрішнього RC-генератора може бути збільшена на 10% щодо номінальної частоти, не роблячи негативного впливу на роботу мікроконтролера. Докладніша інформація щодо регулювання вбудованого RC-генератора може бути знайдена в документації на мікроконтролер AVR. Зверніть увагу, що конфігураційний біт CKDIV8, який керує діленням частоти синхронізації на 8, запрограмований за замовчуванням. Для отримання частоти синхронізації 9.6 МГц даного конфігураційного біта необхідно скинути. Використання АЦП для вимірювання зворотної ЕРС. Запуск перетворення АЦП в мікроконтролері ATtiny13, як було сказано вище, виконується при переповнюванні таймера-лічильника. При використанні таймера в режимі двонаправленої лічби переповнювання виникає при досягненні таймером нижньої межі лічби (нуля), тобто коли ШІМ-сигнал не змінює свого стану (крім випадків, коли використовується мале заповнення імпульсів). Більшість вентиляторів використовують заповнення імпульсів між 10% і 40%, тому шуми, що виникають при комутації, не роблять впливу на результат перетворення. Якби не було можливості запускати оцифрування при переповнюванні таймера, то необхідно було б виконувати ефективну аналогову фільтрацію або виконувати складні обчислення для реалізації керування без датчиків двофазним БКЕПС, оскільки комутаційні шуми можуть накладатися на ЕРС. Керування перемиканням каналу АЦП виконується в тій же частині програмного коду, де виконується оцінка результату вимірювання АЦП і керування комутацією обмоток. Даний процес детальніше розглядається в розділі, присвяченому керуванню комутацією. АЦП може вимірювати з роздільною здатністю до 10 розрядів і частотою 15 тисяч перетворень в секунду. При вищих частотах перетворення зменшується роздільна здатність. У запропонованій реалізації обробка результатів вимірювання ЕРС, а також зовнішнього сигналу швидкості, виконується в процедурі обробки переповнювання таймера-лічильника. Для гарантування достатності часу для обробки переривання необхідно вибрати частоту синхронізації АЦП, рівну  $1/8$  від частоти системної синхронізації, тобто 1.2 МГц. Використання даної

високої частоти синхронізації АЦП призводить до зниження роздільної здатності приблизно до 8 біт, але цього достатньо для успішного прочитування ЕРС. Попереднє позиціонування і запуск. Попереднє позиціонування ротора виконується шляхом збільшення напруги живлення обмоток і затримки на заданий час до тих пір, поки ротор не встановиться в бажане положення. Після цього напруга живлення обмоток зменшується, щоб ротор перейшов в положення спокою. Після цього двигун запускається без зворотного зв'язку із затримками між перемиканнями відповідно до таблиці перетворення. Це дозволяє адаптувати керування під механічні характеристики керованого двигуна. Затримки між перемиканнями обмоток можна обчислити, якщо відомі характеристики розгону двигуна. Альтернативно, час розгону двигуна можна визначити шляхом контролю напруги на обмотках за допомогою осцилографа. Комутація. Після закінчення послідовності запуску активізується комутація без датчиків положення шляхом дозволу переривання після переповнювання таймера-лічильника. Використовується блочна схема комутації. Для вимірювання ЕРС використовується вбудований АЦП. Виміряне значення ЕРС порівнюється з пороговим значенням. Якщо ЕРС перетинає порогове значення, то виконується перемикання обмоток. Щоб уникнути помилок, викликаних перехідними процесами при перемиканні, декілька оцифрувань після перемикання ігноруються. Зовнішнє задавання швидкості. Зовнішнє задавання швидкості реалізоване у вигляді аналогового входу, який мікроконтролер оцифровує для визначення бажаної частоти обертання двигуна. Безпосереднє прочитування заданої частоти обертання виконується в процедурі обробки пере-ривання таймера-лічильника після закінчення вимірювання зворотної ЕРС. Контур стабілізації швидкості реалізований в основному циклі. Стабілізація частоти обертання виконується за алгоритмом покрокового збільшен-ня/зменшення швидкості. При необхідності може бути реалізований ПІ-закон керування. Вихід сигналу з інформацією про швидкість. У вентиляторів часто передбачається вихід з відкритим колектором для генерації сигналу, що поступає до ЦПУ ПК (або іншого пристрою), з інформацією про частоту обертання вентилятора. Дану функцію можна реалізувати, якщо задіювати виведення скидання мікроконтролера ATtiny13, який можна перенастроювати на виконання функції лінії введення-виведення. Програмна реалізація даної функції дозволяє позбавитися необхідності застосування будь-яких зовнішніх компонентів, тим самим, знижуючи загальну вартість системи.

Програмна реалізація даного пристрою керування двофазним БКЕПС подана у вигляді блок-схеми на рис. 9.



9 - Блок-схема програми керування двофазним БКЕПС

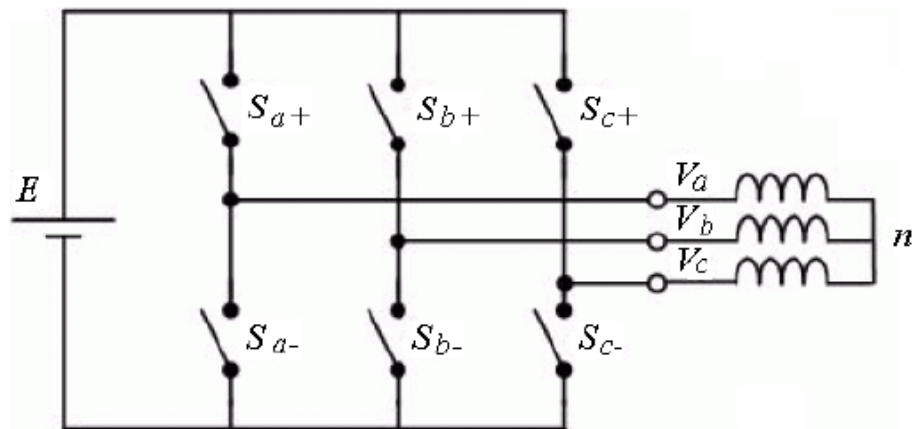
## 2. Керування асинхронним електродвигуном змінного струму за принципом постійності $V/f$ і звичайного ШІМ-керування

В цілях охорони навколишнього середовища і зниження ефекту випромінювання парникових газів у всьому світі вводять правила, що вимагають від виробників побутового електроустаткування і промислових під-приємств випускати продукцію таку, яка більш економічно витрачає електроенергію. Найчастіше цього можна досягти за рахунок ефективного керування швидкістю електродвигуна. Це є причиною, чому розробники побутових приладів і постачальники напівпровідників в наш час зацікавлені в розробці недорогих і економічних регульованих приводів. За рахунок високої витривалості, надійності, низької вартості і високого к.п.д. (80%) асинхронні електродвигуни використовуються в багатьох промислових застосуваннях, в т.ч.:

- побутових електроприладах (пральні машини, витяжки, холодильники, вентилятори, пилососи, компресори і ін.);
- системах нагрівання, вентиляції і кондиціонування повітря;
- промислових електроприводах (керування рухом, відцентрові насоси, робототехніка і ін.);
- автомобілях (електромобілях). Проте недоліком асинхронних двигунів є робота тільки на номінальній швидкості при під'єднанні до мережі.



Це є причиною, чому перетворювачі частоти необхідні для регулювання частоти обертання асинхронних електродвигунів. Найбільш популярним алгоритмом керування трифазним асинхронним електродвигуном є алгоритм з підтримкою постійності відношення напруга/частота (правило Костенко) і використанням звичайного ШІМ керування інвертором напруги, як показано на рис. 12. Тут демонструється реалізація даного способу на основі AVR RISC-мікроконтролера AT90PWM3, розробленого спеціально для застосування в силовій електроніці.



12 - Типова структура інверторного асинхронного привода

Ключові особливості AT90PWM3. Алгоритми керування реалізовані на основі недорогого і економічного однокристального мікроконтролера, який досягає продуктивності 16 мільйонів інструкцій в секунду і орієнтований на застосування як пристрій керування в підвищувальних/понижувальних перетворювачах постійної напруги, синхронних електричних машинах на основі постійних магнітів, трифазних асинхронних двигунів і безколекторних електродвигунів постійного струму. Мікроконтролер містить:

- ядро, виконане на основі 8-розрядної AVR RISC-архітектури;
- 8 кбайт програмованої флеш-пам'яті програм, яка дозволяє зберігати до 4096 інструкцій і розділена на сектори прикладної програми і завантажувального коду;
- 512 байт статичного ОЗП для зберігання змінних і таблиці перетворення, які використовуються в прикладній програмі;
- 512 байт ПЗП для зберігання конфігураційних даних і таблиць перетворення;
- один 8-розрядний таймер і один 16-розрядний таймер;
- програмований WatchDog-таймер з внутрішнім генератором;
- 11-канальний 10-розрядний АЦП і 10-розрядний ЦАП.

Основною особливістю, яка робить даний мікроконтролер привабливим для застосування в пристроях керування електроприводами, є інтеграція трьох контролерів керування силовим каскадом. До складу даних периферійних пристроїв входять 12-розрядні реверсивні лічильники з двома компараторами, виходи яких можуть керувати силовими транзисторами інвертора. Ці елементи дозволяють генерувати будь-яку трифазну форму,

використовуючи широтно-імпульсну модуляцію, і підтримують просте керування паузами неперекриття. Асинхронний електродвигун. У протилежність колекторним і безколекторним електродвигунам постійного струму асинхронні електродвигуни не містять постійних магнітів. Ротор виконаний у вигляді короткозамкнутої обмотки, в якій електричне поле, що обертається, створює магнітний потік. Завдяки відмінностям в швидкості між електричним полем статора і магнітним потоком в роторі електродвигун здатний створювати обертальний момент і здійснювати обертальний рух. Принцип постійності відношення напруга/частота (правило Костенка). Принцип постійності відношення напруга/частота найбільш широко поширений в сучасних регульованих асинхронних приводах. Він може використовуватися в застосуваннях, які не потребують високих динамічних характеристик, а необхідно тільки ефективно варіювати частотою обертання в повному діапазоні. Це дозволяє використовувати синусоїдальну сталу модель асинхронного електродвигуна, в якій величина магнітного потоку статора пропорційна відношенню амплітуди і частоти напруги обмотки, статора. Якщо дане відношення підтримувати на постійному рівні, то постійність зберігатиме і магнітний потік статора і, таким чином, обертальний момент залежатиме тільки від частоти ковзання. Точніше, виходячи із звичайної моделі асинхронного електродвигуна:

$$\frac{d\phi_s}{dt} + R_s I_s = V_s; \quad \frac{d\phi_r}{dt} - j\omega_m \phi_r + R_r L_r = 0;$$

$$\phi_s = L_s I_s + L_m I_r; \quad \phi_r = L_r I_r + L_m I_s;$$

$$C_{em} = \frac{3p}{2} L_m \cdot \text{Im}(I_s I_r); \quad \Omega_m = \frac{\omega_m}{p},$$

Де  $V_s, \phi_s, \phi_r, I_s, I_r$  - напруга статора, магнітні потоки статора і ротора, струми статора і ротора, відповідно;

$R_s, R_r, L_s, L_r, L_m, \omega_m$  - загальний опір статора, опір ротора, індуктивність статора, індуктивність ротора, загальна індуктивність розсіювання і кутова частота обертання, відповідно. При живленні електродвигуна трифазною синусоїдальною напругою з частотою  $\omega_s$ , сталі струми в роторі і статорі також матимуть синусоїдальну форму з частотою

$$\omega_s \text{ і } I_r = I_{r \max} e^{j(\omega_s t + \varphi_r)}.$$

Перетворимо попередні вирази до вигляду

$$I_s = \frac{R_r + jL_r \omega_{slp}}{\Delta} V_s; \quad I_r = -\frac{jL_m \omega_{slp}}{\Delta} V_s; \quad \phi_r = \frac{L_m R_r}{\Delta} V_s,$$

де  $\Delta = (R_s + jL_s \omega_s)(R_r + jL_r \omega_{slp}) + L_m^2 \omega_{slp} \omega_s$ . Проте амплітудне значення може залишатися постійним при збереженні постійності

відношення  $\frac{V_{sm}}{|\Delta|}$ . На високих швидкостях амплітудне значення магнітного

потoku ротора залишається постійним при постійності відношення  $\frac{V_{sm}}{\omega_s}$ .

$$\phi_{rm} \approx \frac{L_m R_r}{R_r L_s \omega_s} = \frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{V_{sm}}{\omega_s}$$

Тоді крутний момент електродвигуна пропорційний частоті ковзання:

$$C_{em} = \frac{3p}{2} \frac{\phi_{rm}^2}{R_r} \omega_{slp}$$

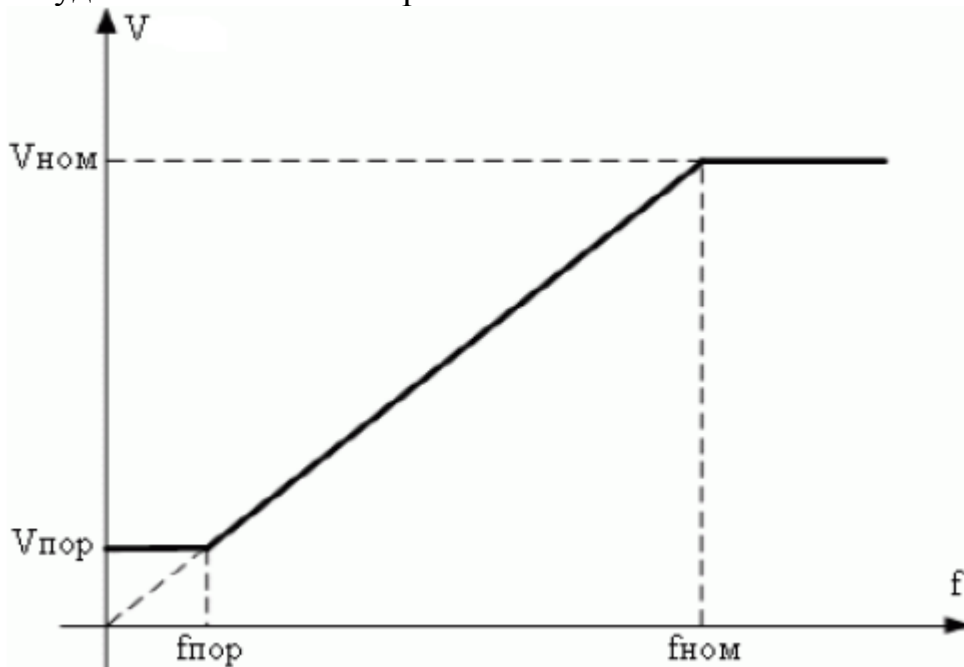
. Дані вирази показують, що бажані значення обертового моменту і частоти обертання електродвигуна можуть бути

$$\omega_s = \omega_m + \frac{2C_{em} R_r}{3p \phi_{rm}^2}$$

досягнуті, якщо

$$\phi_r \approx \frac{L_m}{R_s} V_s$$

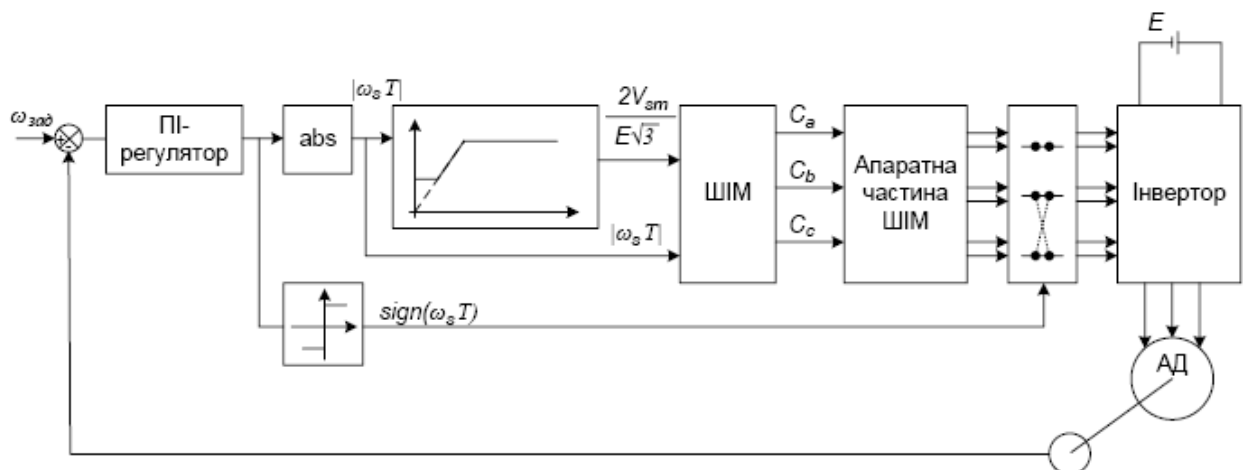
. На низьких швидкостях Коли частота статора знижується менше певної порогової частоти, амплітуду напруги необхідно підтримувати на певному рівні для підтримки постійності магнітного потоку ротора. У протилежність цьому, коли частота стає вищою за номінальне значення, амплітуда напруги залишиться на номінальному рівні зважаючи на насичення ключів інвертора. В цьому випадку потік ротора буде непостійним і обертовий момент знизиться.



13 - Залежність амплітуди напруги статора від частоти статора за принципом V/f

Скалярний принцип керування "V/f" полягає в подачі на обмотки електродвигуна трифазної синусоїдальної напруги, амплітуда якої пропорційна частоті, за винятком частот нижчих за порогове значення і

вищих за номінальне, як показано на рис. 13. На практиці нахил, який визначає відношення амплітуди напруги до частоти напруги, визначається за номінальними значеннями напруги живлення і частоти живильної мережі, які наводяться в паспорті на електродвигун, а порогова частота вибирається за відсотками (наприклад, 5%) від номінальної частоти. Даний принцип може використовуватися для побудови контурів автоматичного керування швидкістю (рис. 14), в яких відхилення бажаної швидкості від фактичного вимірюваного значення швидкості поступає в ПІ-регулятор, де обчислюється значення частоти напруги статора. З метою зниження складності регулятора як початкові дані для правила  $V/f$  і векторного ШІМ-алгоритму використовується абсолютне значення частоти напруги статора. Якщо на виході ПІ-регулятора присутнє негативне значення, то для реверсування електродвигуна змінюється вміст двох змінних, які керують силовими транзисторами інвертора. Необхідно відмітити, що принцип керування, розглянутий тут, може використовуватися тільки в застосуваннях, де підтримується постійний рівень швидкості при будь-якому допустимому моменті опору. У застосуваннях, де необхідно підтримувати постійність моменту опору при будь-яких значеннях частоти обертання, необхідне вимірювання струмів статорів і складніші принципи керування.



14 - Блок-схема системи автоматичного керування швидкістю за принципом  $V/f \omega$

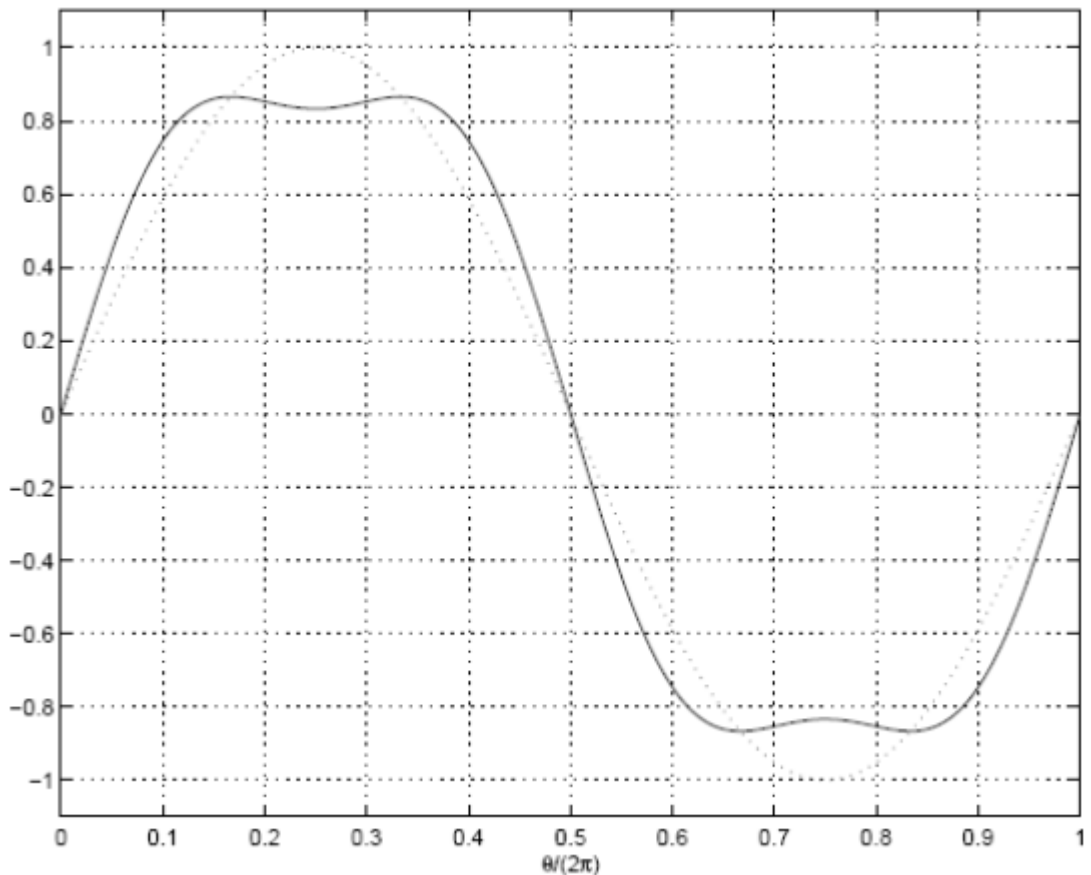
Принцип звичайної широтно-імпульсної модуляції. Одним із способів рішення задачі формування за допомогою інвертора трифазної синусоїдальної системи напруг із зсувом за фазою 120 градусів на обмотках статора є використання таблиці синусів. В цьому випадку частота статора  $s$  визначає три дискретні часи інтеграторів, які обчислюють миттєві значення фаз для кожної напруги статора:

$$\begin{aligned}
\theta_1[k] &= \theta_1[k-1] + \omega_s[k]T_s; \\
\theta_2[k] &= \theta_2[k-1] + \omega_s[k]T_s; \\
\theta_3[k] &= \theta_3[k-1] + \omega_s[k]T_s; \\
\theta_1[0] &= 0; \theta_2[0] = -2\pi/3; \theta_3[0] = -4\pi/3,
\end{aligned}$$

де  $T_s$  - період дискретизації для алгоритму керування. Якщо одне з цих значень стає більшим  $2\pi$ , то для підтримки області значень в діапазоні від 0 до  $2\pi$  від результуючого значення віднімається 2. Таблиця синусів використовується для обчислення трьох напруг, які необхідно прикласти до статора:

$$\begin{aligned}
V_a[k] &= V_{sm}(\omega_s[k]) \text{sita}(\theta_1[k]); V_b[k] = V_{sm}(\omega_s[k]) \text{sita}(\theta_2[k]); \\
V_c[k] &= V_{sm}(\omega_s[k]) \text{sita}(\theta_3[k]),
\end{aligned}$$

де  $V_{sm}(\omega_s)$  - амплітуда напруги статора, визначена за принципом постійності відношення напруга-частота і  $\text{sita}(\theta) = \sin(\theta)$ . . Досягти поліпшення можна шляхом додавання до чистої синусоїди в таблиці синусів третьої гармоніки  $\text{sita}(\theta) = \sin(\theta) + 1/6 \cdot \sin(3\theta)$ , оскільки вона не робить вплив на поведінку електродвигуна і дозволяє генерувати сигнал, перша гармоніка якого має амплітуду на 15.47% вищу ( $2/\sqrt{3}$ ) в порівнянні з максимумом сигналу (рис. 15).

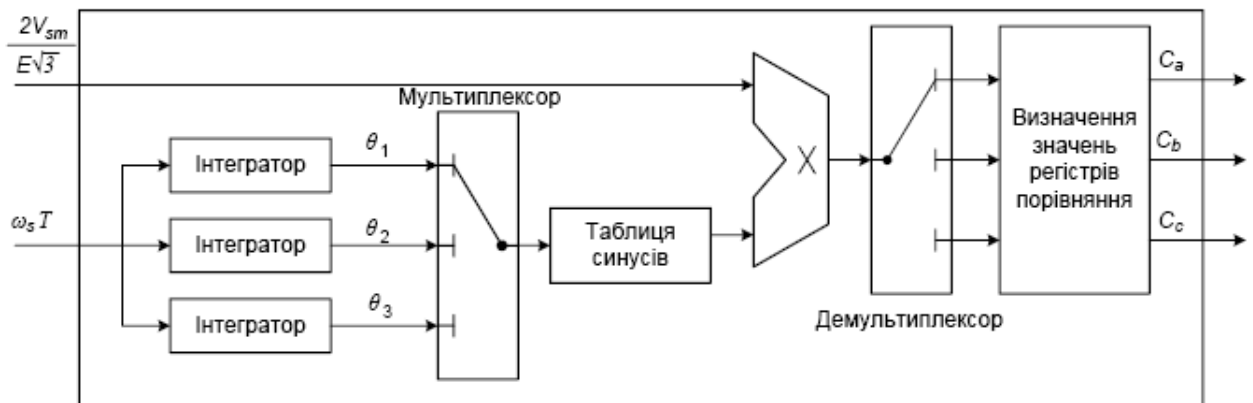


### 15 - Використання несинусоїдної форми напруги для збільшення відношення між амплітудою першої гармоніки і максимальним значенням

З урахуванням даного покращення є можливість генерувати вищу змінну напругу при живленні від тієї ж самої шини постійної напруги. Таким чином, є можливість збільшення частоти обертання електродвигуна при збереженні постійності відношення  $V/F$ . Дані значення порівнюють з виходом реверсивного лічильника (використовується як генератор трикутних імпульсів). Коли вихідне значення реверсивного лічильника переступає через дані значення, перемикається відповідний вихід компаратора. Як результат, в кожному ШІМ-каналі генеруються імпульси, коефіцієнт заповнення яких пропорційний відповідному значенню напруги статора. Оскільки даний реверсивний лічильник з трьома компараторами достатньо складний для програмної реалізації, то такий пристрій повинен бути присутнім в мікроконтролері як вбудований апаратний блок. Це і послужило причиною вибору мікроконтролера AT90PWM3, до складу якого входять три контролери силового каскаду (PSC). Якщо розглянути як приклад першу фазу, коефіцієнт заповнення імпульсів, що задається вмістом регістра порівняння відповідного PSC, буде пропорційний

$$\frac{T_s}{2} \left( 1 + \alpha \frac{V_a[k]}{V_{s\max}} \right),$$

де,  $V_{s\max}$  і  $T_s$  - найбільше значення амплітуди напруги статора і тривалість паузи неперекриття силових ключів, відповідно. Результуюча блок-схема показана на рис. 16.

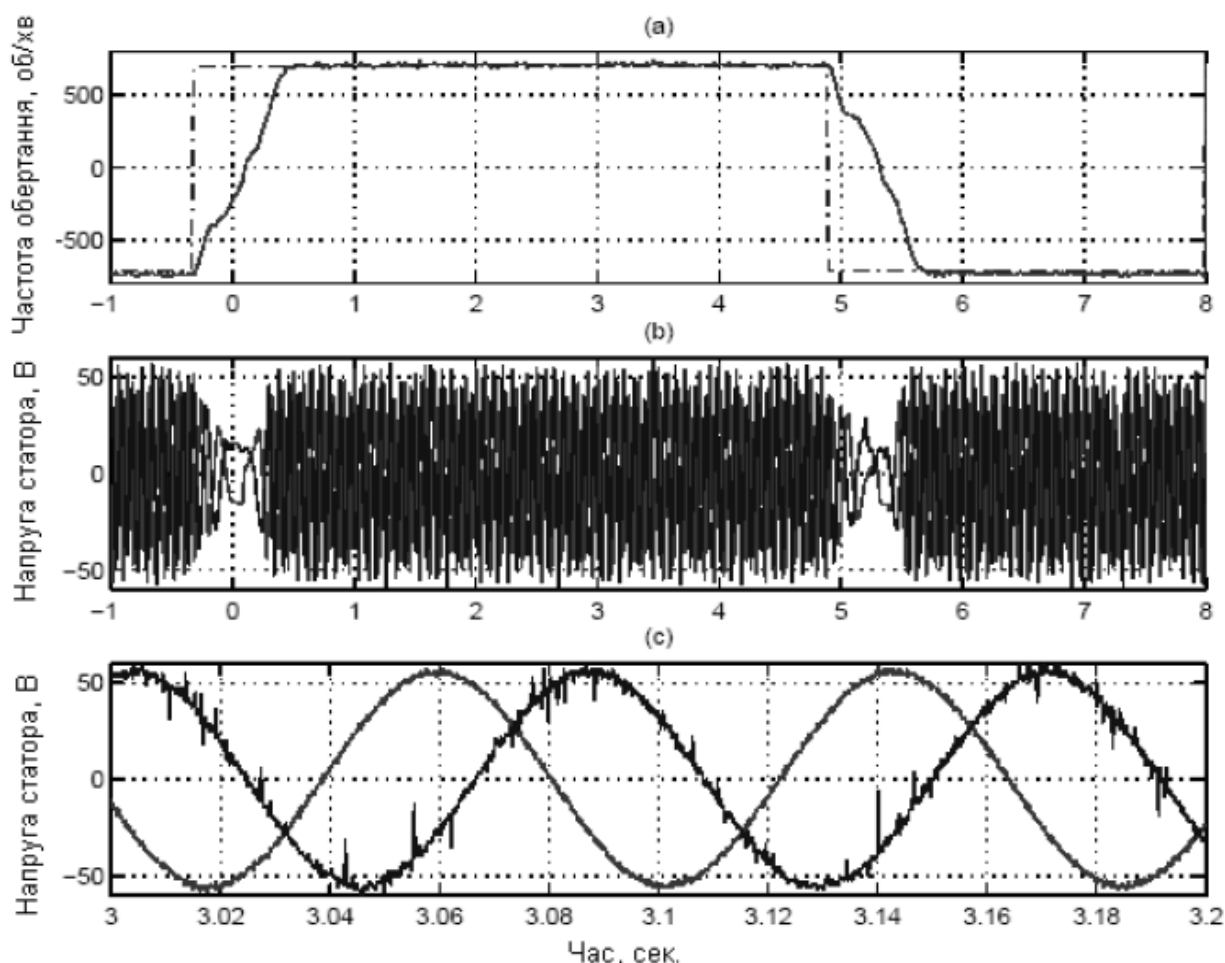


5.16 - Блок-схема звичайного ШІМ-керування

Датчики для керування електродвигуном. Датчики швидкості відіграють важливу роль в керуванні із зворотним зв'язком. Для визначення частоти і напрямку обертання ротора можуть використовуватися декілька рішень. Найбільш точним, але при цьому і найдорожчим, є використання абсолютного шифратора (енкодера) або шифратора (кодера) приростів. Вартість даних оптичних датчиків висока і співвідноситься з вартістю електродвигуна. Іншим рішенням є використання тахогенератора, механічно пов'язаного з ротором електродвигуна. Для під'єднання даного датчика до

мікро-контролера буде потрібно один канал аналогово-цифрового перетворення.

Третім рішенням є використання датчиків на ефекті Холла. Дані недорогі безконтактні датчики в наш час випускаються у вигляді компактних корпусних інтегральних схем, до складу яких входять власне датчик і схема формування вихідного сигналу. Такі мікросхеми формують вихідний сигнал, який може бути безпосередньо під'єднаний до порту введення-виведення мікроконтролера. На рис. 17 наведені перехідні процеси для частоти обертання і на-пруг статорів, одержаних під керуванням мікроконтролера при стрибкоподібній зміні заданих швидкостей обертання між +700 і -700 оборотів в хвилину. Дані результати отримані при керуванні асинхронним електродвигуном потужністю 750 Вт (з навантаженням не більше 370Вт). Даними рисунками демонструється, що бажана швидкість досягається після закінчення 1 секундного перехідного процесу і що при досягненні частотою статора на виході ПІ-регулятора значення близького до нуля амплітуда напруги статора стає рівною пороговій напрузі ("boost voltage").



17 - Експериментальні результати, одержані за допомогою таблиці перетворення ідеальної синусоїди