



УДК 621.313

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-4-13

КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ ЗМІННОГО СТРУМУ ЗА ПРИНЦИПОМ ПОСТІЙНОСТІ V/F І ЗВИЧАЙНОГО ШІМ-КЕРУВАННЯ

Возняк Олександр Миколайович, к.н.т., доцент
Штуць Андрій Анатолійович, асистент
Вінницький національний аграрний університет

Oleksandr Voznyak, Ph.D., Associate Professor
Andrii Shtuts, Assistant
Vinnytsia National Agrarian University

Принцип дії будь-якої автоматичної системи керування полягає у виявленні відхилень регульованих величин від заданих значень і формування впливів на процес керування для усунення цих відхилень. Часто змінну величину, значення якої необхідно підтримувати постійно або змінювати за бажаним законом, називають керованою величиною (координатою). Необхідне значення регульованої величини (координати) прийнято називати заданим, а фактичне - поточним. Різниця між заданим і поточним значеннями є відхиленням або сигналом помилки. Сукупність пристроїв, які впливають на об'єкт керування, підтримуючи поточне значення керованої величини (координати) рівним заданому, називають автоматичним регулятором або динамічною системою.

Вплив регулятора на об'єкт із метою наближення поточного значення керованої величини до заданого (або додання замкнутій системі бажаних властивостей), називають керуючим впливом, а сукупність пристроїв і фізичних середовищ, через які керуючий вплив діє на керовану величину - каналом керування.

Процес керування, здійснюваний регулятором, проявляється в зміні заданого значення регульованої величини або відхиленні хоча б однієї з нерегульованих величин, що впливають на регульовану через ланцюги зворотних зв'язків (ЗЗ). Зміну заданого значення регульованої величини називають керуючим або внутрішнім задаючим впливом, а зміну нерегульованих величин - зовнішнім збурюванням. Принцип керування за відхиленням полягає в порівнянні заданого значення регульованої величини (установки) з її поточним значенням. У цьому випадку сигнал помилки Δ використовується для створення такого регулюючого впливу на об'єкт керування, при якому ця помилка, незалежно від причин, що її викликали, не виходить за межі припустимих значень.

В цілях охорони навколишнього середовища і зниження ефекту випромінювання парникових газів у всьому світі вводять правила, що вимагають від виробників побутового електроустаткування і промислових підприємств 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.

Ключові слова: керування, електропривод, асинхронний двигун, пускові режими.

Ф. 7. Рис.6. Літ. 10.

1. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Регулювання швидкості у відповідності з вимогами технологічного процесу є однією з основних задач автоматизованого електроприводу. Регульований електропривод дозволяє змінювати швидкість виробничого механізму відповідно до керуючої дії, що виробляється системою регулювання або оператором. Регулювання та підтримка швидкості на заданому рівні повинні проводитися незалежно від сил опору, діючих на електромеханічну систему. Для кількісного визначення вимог, що висуваються до електроприводу, і для зіставлення різних способів регулювання швидкості використовуються узагальнені показники регулювання швидкості [1, 2]. Основні з них: діапазон регулювання, точність і стабільність регулювання, плавність, динамічні показники якості, економічність регулювання та ін.

Сучасний електропривод – це електромеханічна система, що включає силовий перетворювач, електродвигун, передавальний механізм і систему керування, яка призначена для приведення в рух



робочих органів машин і механізмів [3].

Електропривод – основний споживач електроенергії: більше 60 % усієї електроенергії, яка виробляється в країні, перетворюється на механічну роботу за допомогою електропривода. За сучасних умов особливого значення набуває комплекс питань, пов'язаних з енергозбереженням в електроприводі, оскільки, з одного боку, особливо гострою стала проблема економії електроенергії, і, з іншого – з'явилися реальні можливості її ефективного розв'язання [3].

Останні десятиліття характеризуються бурхливим розвитком технічних засобів керування: силових напівпровідникових приборів, елементів мікроелектроніки, мікропроцесорної техніки і т. д. Сказане призвело до можливості принципового розширення функцій, які виконуються сучасними автоматизованими електроприводами, включаючи керування режимами, енергозбереження, діагностування несправностей і т. д.

Невід'ємною частиною регульованого електропривода є керований силовий перетворювач, який забезпечує плавне регулювання швидкості електричних двигунів шляхом перетворення фіксованих значень напруги і частоти мережі на величини, що змінюються. Перетворювачі частоти характеризуються відповідними принципами побудови і роботи, критеріями вибору і захисними функціями [4-8].

В цілях охорони навколишнього середовища і зниження ефекту випромінювання парникових газів у всьому світі вводять правила, що вимагають від виробників побутового електроустаткування і промислових підприємств 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.

2. Мета дослідження

Метою роботи: Полягає в керуванні асинхронним електродвигуном змінного струму за принципом постійності V/f і звичайного ШІМ-керування.

3. Виклад основного матеріалу

За рахунок високої витривалості, надійності, низької вартості і високого ККД (80%) асинхронні електродвигуни використовуються в багатьох промислових застосуваннях, в т.п.

- 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. 1. Тут демонструється реалізація даного способу на основі мікроконтролера, розробленого спеціально для застосування в силовій електроніці.

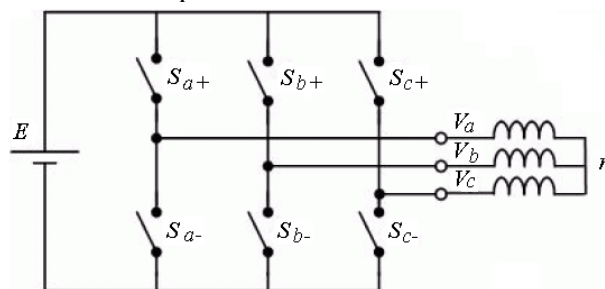


Рис. 1. Типова структура інверторного асинхронного привода

Ключові особливості. Алгоритми керування реалізовані на основі недорогого і економічного однокристалного 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 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 [8-10].

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:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_s}{dt} + R_s I_s &= V_s; \quad \frac{d\varphi_r}{dt} - j\omega_m \varphi_r + R_r L_r = 0; \\ \varphi_s &= L_s I_s + L_m L_r; \quad \varphi_r = L_r I_r + L_m I_s; \\ C_{em} &= \frac{3p}{2} L_m \cdot \text{Im}(I_s I_r); \quad \Omega_m = \frac{\omega_m}{p}, \end{aligned} \quad (1)$$

де V_s , φ_s , φ_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 , ω_m – загальний опір статора, опір ротора, індуктивність статора, індуктивність ротора, загальна індуктивність розсіяння і кутова частота обертання, відповідно.

При живленні електродвигуна трифазною синусоїдальною напругою з частотою ω_s , сталі струми в роторі і статорі також матимуть синусоїдальну форму з частотою ω_s і $I_r = I_{r \max} e^{j(\omega_s t + \varphi_r)}$. Перетворимо попередні вирази до вигляду:

$$I_s = \frac{R_r + jL_r \omega_{slp}}{\Delta} V_s; \quad I_r = -\frac{jL_m \omega_{slp}}{\Delta} V_s; \quad \varphi_r = \frac{L_m R_r}{\Delta} V_s, \quad (2)$$

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 $V_{sm}/|\Delta|$. На високих швидкостях амплітудне значення магнітного потоку ротора залишається постійним при постійності відношення V_{sm}/ω_s :

$$\varphi_m \approx \frac{L_m R_r}{R_r L_s \omega_s} = \frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{V_{sm}}{\omega_s}. \quad (3)$$

Тоді крутний момент електродвигуна пропорційний частоті ковзання: $C_{em} = \frac{3p}{2} \frac{\varphi_m^2}{R_r} \omega_{slip}$.

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

$$\omega_s = \omega_m + \frac{2C_{em} R_r}{3p\varphi_m^2}. \quad (4)$$

На низьких швидкостях $\varphi_r \approx \frac{L_m}{R_s} V_s$. 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.

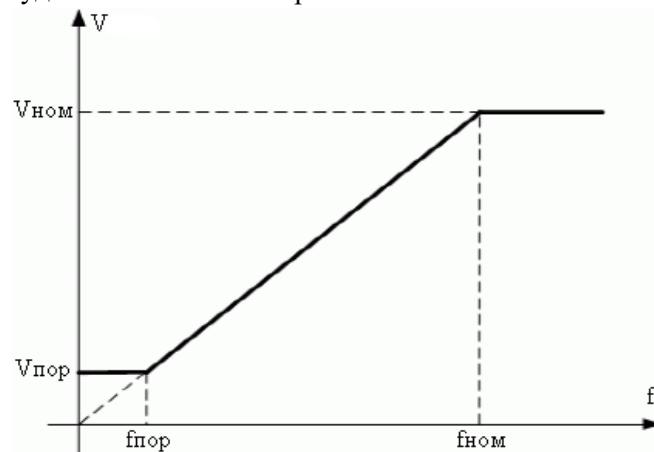


Рис. 2. Залежність амплітуди напруги статора від частоти статора за принципом V/f

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. 2. 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. 3), в яких відхилення бажаної швидкості від фактичного виміряного 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.

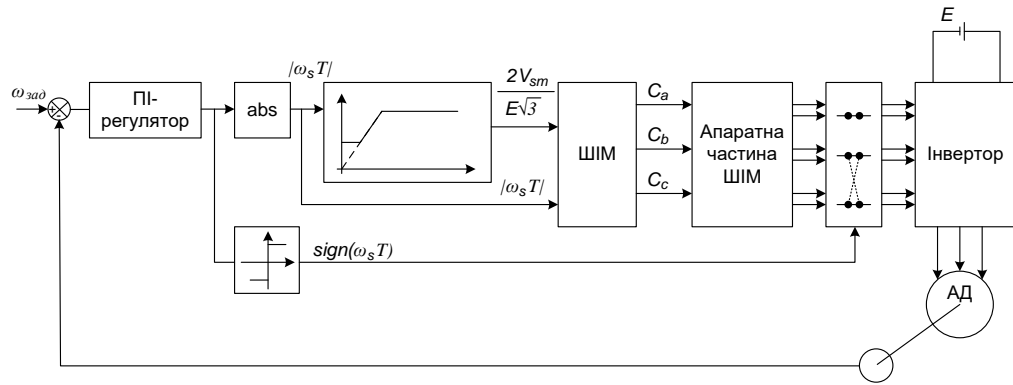


Рис. 3. Блок-схема системи автоматичного керування швидкістю за принципом $V/f \omega$

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:

$$\begin{aligned} \theta_1[k] &= \theta_1[k-1] + \omega_s[k]T_s; \\ \theta_2[k] &= \theta_2[k-1] + \omega_s[k]T_s; \\ \theta_3[k] &= \theta_3[k-1] + \omega_s[k]T_s; \\ \theta_1[0] &= 0; \theta_2[0] = -2\pi/3; \theta_3[0] = -4\pi/3, \end{aligned} \quad (5)$$

де T_s – період дискретизації для алгоритму керування.

Якщо одне з цих значень стає більшим 2π , то для підтримки області значень в діапазоні від 0 до 2π від результуючого значення віднімається 2π . Таблиця синусів використовується для обчислення трьох напруг, які необхідно прикласти до статора:

$$\begin{aligned} V_a[k] &= V_{sm}(\omega_s[k]) \text{sita}(\theta_1[k]); V_b[k] = V_{sm}(\omega_s[k]) \text{sita}(\theta_2[k]); \\ V_c[k] &= V_{sm}(\omega_s[k]) \text{sita}(\theta_3[k]), \end{aligned} \quad (6)$$

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. 4).

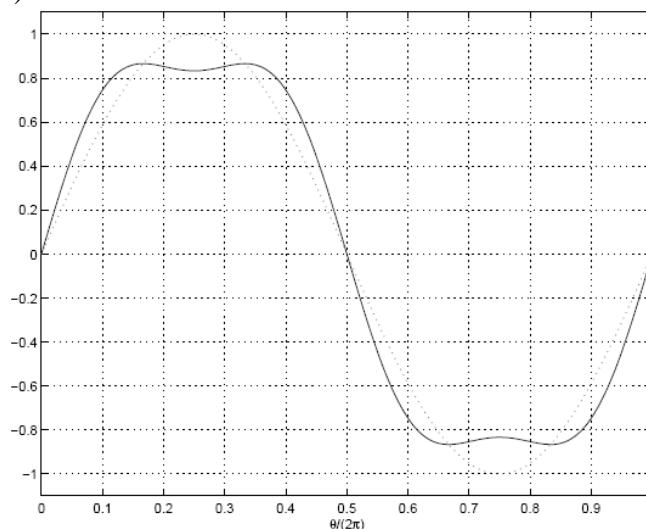


Рис. 4. Використання несинусоїдної форми напруги для збільшення відношення між амплітудою першої гармоніки і максимальним значенням



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:

$$\frac{T_s}{2} \left(1 + \alpha \frac{V_a [k]}{V_{s \max}} \right), \quad (7)$$

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. 5.

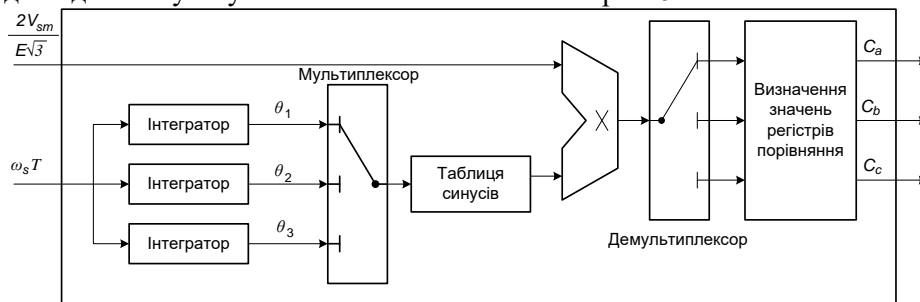


Рис. 5. Блок-схема звичайного ШІМ-керування

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) пристроїв. 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 мікроконтролера 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.

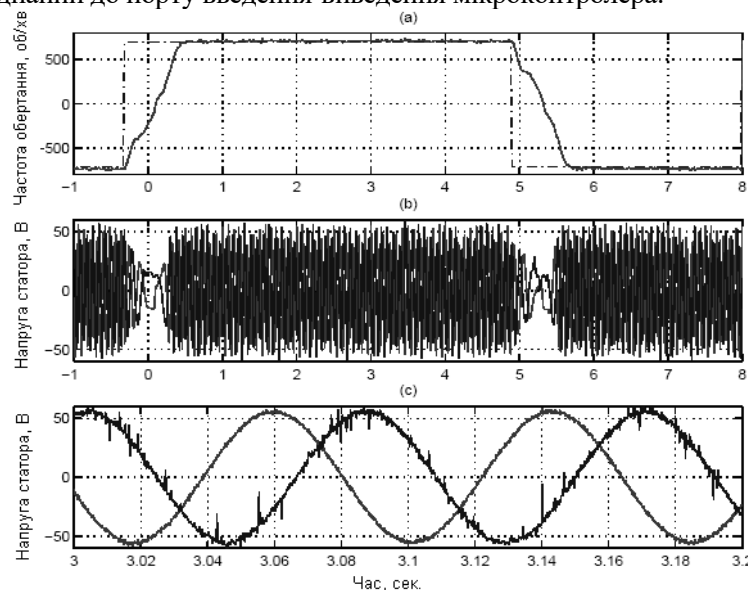


Рис. 6. Експериментальні результати, одержані за допомогою таблиці перетворення ідеальної синусоїди



Визначення параметрів об'єкта керування. На рис. 6 наведені перехідні процеси для частоти обертання і напруг 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").

4. Висновки

Перевага способу полягає в повному усуненні недоліків амплітудного регулювання напруги, висока швидкодія, гарна форма вихідної напруги або струму (близька до синусоїдальної при ШІМ), істотне спрощення випрямляча - він може бути некерованим.

В останньому випадку коефіцієнт потужності перетворювача близький до одиниці у всьому діапазоні регулювання напруги. До недоліків варто віднести ускладнення схеми інвертора й системи керування; підвищені втрати в силових елементах інвертора, обумовлені високою частотою комутації ключів. Незважаючи на зазначені недоліки, згадані способи широко застосовуються у швидкодіючих позиційних електроприводах виробничих механізмів і машин, а також у приводах складних ТС із глибоким регулюванням швидкості в зоні "малих" переміщень РО.

Список використаних джерел

1. Возняк О. М., Штуць А. А., Колісник М. А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика. Частина 1. Навчальний посібник. Вінниця: ТВОРИ, 2021. 280 с.
2. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. навчальний посібник: Вінниця: ВНАУ, 2020. 388 с.
3. Возняк О. М., Штуць А. А. Розрахунок нестандартних W-параметрів чотириполюсника на біполярному транзисторі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 2 (109). С. 122–128.
4. Видмиш А. А. Штуць А. А. Дослідження динамічних характеристик замкненої системи електропривода гравітаційного бетонозмішувача шляхом комп'ютерного моделювання *Вісник ХНУ. Серія: Технічні науки*. 2021. № 1 (293). С. 113–125.
5. Стаднік М. І., Видмиш А. А., Штуць А. А., Колісник М. А. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика: навч. посіб. Вінниця: ТОВ "ТВОРИ", 2020. 332 с.
6. Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М., Казак М. О. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 197 с.
7. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування. Київ: Либідь, 1997. 544 с.
8. Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Ю., Сисюк О. В. Моделювання електромеханічних систем: підручник. Кременчук. 2001. 376 с.
9. Перетворювач частоти. Каталог Altivar 28 фірми Schneider electric. URL: http://files.imcsYs.com/se/Q2cat_atv.28.pdf
10. Shtuts A., Kolisnyk M., Yavdyk V. Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2018. P. 19–25.

References

- [1] Vozniak, O.M., Shtuts, A.A., Kolisnyk, M.A. (2021). *Suchasni systemy elektropyvodiv. Teoriia ta praktyka. Vol. 1. Navchalnyi posibnyk*. Vinnytsia: TOV "TVORY". [in Ukrainian].
- [2] Vydmysh, A.A., Yaroshenko, L.V. (2020). *Fundamentals of electric drive. Theory and practice. Part textbook*. Vinnytsia: VNAU. [in Ukrainian].
- [3] Vozniak, O.M., Shtuts, A.A. (2020). Rozrakhunok nestandartnykh W-parametriv chotyrypoliusnyka na bipoliarnomu tranzystori. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 2 (109). 122–128. [in Ukrainian].
- [4] Vidmish, A.A., Shtuc, A.A. (2021). Doslidzhennja dinamichnih harakteristik zamkненої sistemi elektropyvoda gravitacijnogo betonozmishuvacha shljahom komp'juternogo modeljuvannja. *Visnik HNU. Serija: Tehnichni nauki*, 1 (293). 113–125. [in Ukrainian].
- [5] Stadnik, M.I., Vydmysh, A.A., Shtucz, A.A., Kolisnyk, M.A. (2020). *Intelektualni systemy v elektroenergetyци*. Teoriya ta praktyka: navch. posib. Vinnytsya: TOV "TVORY". [in Ukrainian].
- [6] Grabko, V.V., Rozvodyuk, M.P., Levitsky, S.M., Kazak, M.A. (2007). *Experimental studies of electric*



- machines. Part III. Asynchronous machines. Textbook. Vinnitsia: VNTU. [in Ukrainian].*
- [7] Popovich, M.G., Kovalchuk, A.V. (1997). *Theory of automatic control. Kyiv: Libid. [in Ukrainian].*
- [8] Cherny, A.P., Lugovoy, A.V., Rodkin, D.Yu., Sisyuk, A.V. (2001). *Modeling of electromechanical systems: textbook. Kremenchug. [in Ukrainian].*
- [9] *Frequency converter. Catalog of Altivar 28 by Schneider electric. URL: http://files.imcsYs.com/se/Q2cat_atv.28.pdf [in Ukrainian].*
- [10] Shtuts, A., Kolisnyk, M., Yavdyk, V. (2018). Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 19–25. [in English].*

CONTROL OF ASYNCHRONOUS AC ELECTRIC MOTOR ACCORDING TO THE PRINCIPLE OF CONSTANT V/F AND CONVENTIONAL PWM CONTROL

The principle of operation of any automatic control system is to detect deviations of regulated values from set values and to form influences on the control process to eliminate these deviations. Often, a variable value whose value must be maintained constantly or changed according to the desired law is called a controlled value (coordinate). It is customary to call the required value of the regulated value (coordinate) set, and the actual value - current. The difference between the setpoint and the actual value is a deviation or error signal. A set of devices that affect the object of control, maintaining the current value of the controlled quantity (coordinate) equal to the given one, is called an automatic regulator or a dynamic system.

The influence of the regulator on the object with the aim of bringing the current value of the controlled value closer to the set value (or adding the desired properties to the closed system) is called the control influence, and the set of devices and physical environments through which the control influence acts on the controlled value is called the control channel.

The control process carried out by the regulator manifests itself in a change in the set value of the regulated quantity or a deviation of at least one of the unregulated quantities that affect the regulated one through feedback circuits. A change in the set value of an adjustable quantity is called a controlling or internal setting influence, and a change in unregulated quantities is called an external disturbance. The principle of deviation control is to compare the set value of the regulated value (setting) with its current value. In this case, the error signal Δ is used to create such a regulatory influence on the control object that this error, regardless of the reasons that caused it, does not go beyond the permissible values.

In order to protect the environment and reduce the effect of greenhouse gas emissions, regulations are being introduced all over the world that require manufacturers of household electrical equipment and industrial enterprises to produce products that use electricity more economically. Most often, this can be achieved by effectively controlling the speed of the electric motor. This is the reason why consumer appliance developers and semiconductor suppliers are now interested in developing low-cost and economical adjustable actuators.

Key words: control, electric drive, asynchronous motor, starting modes.

F. 7. Fig. 6. Ref. 10.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Возняк Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: alex.voz1966@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0986-6869>).

Штуць Андрій Анатолійович – асистент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Oleksandr Voznyak – candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: alex.voz1966@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0986-6869>).

Andrii Shtuts – Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: shtuts1989@gmail.com , <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).