

О. ЛЯШЕНКО, М. СТАРОДУБЦЕВ, Г. МАКАРЕНКО, О. ПАЩЕНКО

КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ КОНВЕЄРНИХ ЛІНІЙ

Предметом дослідження є метод керування швидкістю асинхронного двигуна, увімкненого за схемою асинхронно-вентильного каскаду, що підвищує коефіцієнт потужності привода й позитивно впливає на енергосистему загалом. **Мета роботи** – розроблення та дослідження методів керування електромеханічними системами на базі асинхронного електропривода, що забезпечують високоефективну роботу реалізованих на їх основі конвеєрних ліній як елементів складного технологічного обладнання автоматизованої системи керування технологічними процесами. У статті виконуються такі **завдання**: аналіз задач керування конвеєрними лініями в межах інтегрованої автоматизованої системи управління технологічними процесами виробничих систем; розгляд виконавчих елементів електропривода конвеєрних ліній; розроблення методу регулювання швидкості асинхронного двигуна, увімкненого за схемою асинхронно-вентильного каскаду. **Методологія дослідження** ґрунтується на методах теорії електричних машин, теорії електропривода, чисельних і аналітичних методах розв’язання диференціальних рівнянь, теорії моделювання. **Результати роботи** передбачають метод керування швидкістю асинхронного двигуна, що ґрунтується на реалізації імпульсного керування, що виділяється можливістю підтримки кутів керування повністю керованими силовими напівпровідниковими елементами для досягнення високого значення коефіцієнта потужності та зміни частоти увімкнення силового елемента електронного ключа, що закорочує інвертор. Досліджено вплив тривалості відносної тривалості комутації ключа на характеристики виконавчого елемента. **Висновки**: застосування запропонованого методу імпульсного регулювання електропривода дає змогу розширити верхню межу регулювання швидкості, підвищити коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності електропривода, зменшити індуктивність згладжувального дроселя.

Ключові слова: роботизовані системи; транспортувальний шатл; конвеєрна лінія; автоматизоване керування; асинхронний двигун.

Вступ

Успішна робота сучасного підприємства ґрунтується на масовій автоматизації виробничих процесів, зокрема це стосується транспортування матеріалів, деталей та виробів [1–4].

Сучасні транспортні системи відіграють важливу роль у забезпеченні ефективності та безпеки виробничих процесів. Основні характеристики сучасних транспортних систем передбачають високу швидкість і точність руху, можливість автоматизації процесів та інтеграцію з іншими системами виробництва.

Однією з ключових тенденцій у розвитку транспортних систем є впровадження роботизованих транспортних систем, конвеєрних ліній, автономних виробничих роботів, транспортувальних шатлів і автоматизованих механізмів. Це дає змогу підвищити продуктивність, знизити витрати на персонал і забезпечити високу якість виробничих процесів.

Серед зазначених технічних засобів автоматизації для виконання транспортних завдань на виробництві та забезпечення внутрішньоскладських логістичних процесів ефективно застосовуються транспортні механізми безперервної дії, найбільш поширеними з яких є конвеєри.

Конвеєрні лінії є основним функціональним компонентом більшості сучасних технологічних процесів дискретного типу, вони забезпечують синхронізацію різноманітного технологічного устаткування. Це висуває підвищені вимоги як до енергетичних параметрів конвеєрних систем, так і до характеристик надійності. Ефективність роботи конвеєрних систем суттєво підвищується в разі застосування регульованого асинхронного електропривода (ЕП) за умов поліпшення енергетичних показників [5, 6]. Розроблення методів і систем високонадійного автоматизованого керування ЕП з огляду на особливості конвеєрних ліній дає змогу забезпечити належний рівень якості та надійності всієї конвеєрної системи завдяки поліпшенню енергетики виконавчих елементів і синхронізації їх роботи.

У зв’язку з цим проблема розроблення математичних моделей електромеханічних систем і методів керування електромеханічними системами на базі асинхронного електропривода, орієнтованими на реалізацію в межах конвеєрних ліній як елементів складного технологічного обладнання автоматизованої системи керування технологічними процесами (АСКТП), є актуальною.

1. Конвеєрні лінії в структурі АСКТП дискретного виробництва

Розвиток виробництва, зростання вимог до якості продукції та обсягу випуску зумовлюють упровадження сучасних технологій керування технологічними процесами. Автоматизована система керування технологічними процесами – сукупність апаратно-програмних засобів, що контролюють виробничі та технологічні процеси й керують ними, підтримують зворотний зв'язок і активно впливають на хід процесу за умови відхилення його від заданих параметрів, забезпечують регулювання та оптимізацію керованого процесу [7].

У структурі АСКТП виокремлюють п'ять рівнів ієрархії:

- 1) нижній (рівень локального керування) – рівень датчиків і виконавчих елементів;
- 2) середній (рівень керування процесом) – рівень мікропроцесорних контролерів;
- 3) зв'язковий (рівень керування виробничою ділянкою) – рівень промислових комп'ютерів-складальників;
- 4) оперативний (рівень керування виробництвом) – рівень операторських станцій;
- 5) адміністративний (рівень стратегічного керування) – рівень диспетчерських станцій.

Конвеєрні лінії розташовані на рівні датчиків і виконавчих елементів (нижньому рівні) ієрархічної структури АСКТП.

Основними класифікаційними ознаками конвеєра є тип тягового й вантажонесучого органів [8, 9]. Розрізняють конвеєри зі стрічковим, ланцюговим, канатним та іншими тяговими органами та конвеєри без тягового органа (гвинтові, інерційні, вібраційні, роликові). За типом вантажонесучого органа конвеєри можуть бути модульними стрічковими, стрічковими, пластинчастими, роликовими тощо.

Модульні стрічки конвеєрні – це тип конвеєрної стрічки, що містить окремі модулі, з'єднані між собою за допомогою шарнірних з'єднань або зчіпних елементів. Такі стрічки можуть бути виготовлені з різних матеріалів, зокрема пластику й металу, вони часто використовуються в промисловості для транспортування товарів і матеріалів. Модульна конструкція дає змогу легко замінювати окремі модулі в разі пошкодження, а також змінювати довжину стрічки або її конфігурацію відповідно до конкретних потреб виробництва. Основними

перевагами модульних стрічок є висока міцність, гнучкість, простота обслуговування та можливість адаптації до різних типів виробничих процесів.

Пластинчасті конвеєри – це тип конвеєрних систем, що застосовують жорсткі пластини, сполучені між собою ланцюговими або шарнірними з'єднаннями для створення суцільної рухомої поверхні. Пластини можуть бути виготовлені з металу, пластику або інших міцних матеріалів. Такі конвеєри часто застосовуються для транспортування важких вантажів.

Роликовий конвеєр – це тип конвеєрної системи, в якій транспортування вантажів здійснюється за допомогою обертових роликів, розташованих на рамі. Ролики можуть бути виготовлені з різних матеріалів, зокрема сталі, алюмінію, пластику, і встановлюються на певній відстані один від одного, утворюючи суцільну поверхню для переміщення вантажів.

Стрічковий конвеєр – це тип конвеєрної системи, що використовує безперервну стрічку для транспортування матеріалів або вантажів з одного місця в інше. Стрічка зазвичай виготовлена з гуми, ПВХ, поліуретану або інших міцних матеріалів і натягнута між двома або більше шківками, з яких один або кілька можуть бути приводними.

Отже, конвеєри є невід'ємною частиною сучасного технологічного процесу, вони встановлюють та регулюють темп виробництва, забезпечують його ритмічність, сприяють підвищенню продуктивності праці та збільшенню випуску продукції. Тісний зв'язок транспортувальних машин із загальним технологічним процесом виробництва зумовлюють високу відповідальність їх роботи та призначення. Тому конвеєри мають бути надійними, зручними в експлуатації та здатними працювати в автоматичних режимах [10].

Особливі вимоги висуваються до надійності роботи окремих конвеєрів та конвеєрних ліній загалом [11–13]. Ця вимога посилюється ще й тим, що конвеєрні лінії, як правило, належать до систем, які не резервуються, оскільки установка резервної конвеєрної лінії настільки підвищує капітальні витрати, що конвеєрне транспортування, на відміну від інших видів, за інших рівних умов у деяких випадках стає менш рентабельним.

До основних факторів, що впливають на надійність роботи стрічкових конвеєрів, належить можливість розриву стрічки та її коливання, зумовлені пружністю [14], а також відмова електрообладнання та систем керування.

Зважаючи на сказане вище, можна зробити висновок, що надійна робота АСКТП дискретного виробництва залежить від роботи всіх рівнів ієрархії та насамперед від нижнього й середнього рівнів, тобто від конвеєрної лінії та її системи керування.

2. Аналіз виконавчих елементів конвеєрних ліній

Основним призначенням привода стрічкового конвеєра є забезпечення передачі необхідного тягового зусилля та нормального руху конвеєрної стрічки за всіх режимів роботи.

Для стрічкових конвеєрів найбільшого поширення набув привод з асинхронним двигуном (АД) з фазним ротором [15–17]. Цей пристрій забезпечує оптимальний пуск із заданим прискоренням і тривалістю розгону конвеєрної стрічки. У такому приводі легко здійснювати заданий розподіл тягового зусилля між приводними барабанами.

У разі зміни напруги, що підводиться до статора короткозамкненого АД (тобто в процесі фазового керування), статор під'єднується до мережі за допомогою зустрічно-паралельних тиристорів, що можуть не тільки виконувати функції ключа, але й змінювати діюче значення прикладеної до двигуна напруги у функції відпираючого кута тиристорів. Система фазового керування забезпечує плавний пуск конвеєра, рух стрічки зі зниженою швидкістю, плавний перехід із однієї швидкості на іншу.

Для стрічкових конвеєрів зазвичай використовують дві принципові схеми регульованого електропривода змінного струму з частотним перетворювачем: схему з безпосереднім під'єднанням короткозамкненого АД до перетворювача, під'єданого до мережі живлення, і схему з проміжною ланкою постійного струму. Друга схема забезпечує регулювання частоти в ширшому діапазоні і, отже, більш плавну зміну швидкості руху конвеєрної стрічки. Частота струму змінюється за допомогою подання імпульсів із різною частотою на тиристори інвертора. Система керування в певній послідовності відпирає тиристори, у цьому разі до фаз статора АД підводяться напруги, зсунуті по фазах на 120° .

Пос'єднання регулювання напруги, що підводиться до АД, зі зміною частоти струму дає змогу отримати сімейство регульовальних характеристик.

Основні переваги приводів із частотними перетворювачами такі:

– можливість використання короткозамкнених АД для приводів будь-якої потужності;

– у процесі регулювання швидкості неможливі витрати в реостатах, що підвищує економічність приводу;

– під час пуску АД постійно працює в межах робочої частини характеристики, до того ж кратність пускових струмів знижується до 2–3 замість 5–7;

– з'являється можливість здійснення регульованого пуску з необхідним ступенем плавності;

– забезпечується стабільне та економічне регулювання швидкості в режимі без витрат на ковзання.

Електропривод за схемою асинхронно-вентильного каскаду (АВК) є системою регульованого електропривода змінного струму, що містить АД з фазним ротором, каскадно з'єднаним з іншими електричними машинами або статичними перетворювачами [18, 19].

Перетворювач АВК містить випрямляч, з'єднаний з контактними кільцями ротора двигуна, та інвертора, що перетворює постійний струм у змінний, який крізь узгоджувальний трансформатор надходить у мережу.

Механічні характеристики АД у приводі за схемою АВК мають досить високу жорсткість і за умови зміни імпульсів, що управляють, переміщуються майже паралельно вздовж осі ординат. Якщо енергія ковзання перевищує витрати в обмотці ротора двигуна, а також у силових вентилях і тиристорах, відбувається її рекуперація в мережу, що покращує енергетичні показники привода.

Переваги електропривода за схемою АВК:

– під'єднання статора приводного двигуна безпосередньо до мережі без проміжного перетворювача;

– простий і надійний виконавчий двигун, що не потребує значних витрат щодо догляду;

– в аварійних режимах є можливість переходу на роботу без перетворювача;

– статичні елементи використовуються у вторинному ланцюзі без безпосереднього їх приєднання до джерела електричної енергії;

– одинична потужність і максимальна частота обертання обмежується потужністю та частотою обертання АД;

– можливість плавного регулювання частоти обертання та моменту;

– невелика потужність кіл керування;

– простота увімкнення до замкнутих систем регулювання;

– порівняно невелика потужність перетворювача, особливо в разі обмеженого діапазону регулювання;

– високий коефіцієнт корисної дії (ККД) системи завдяки рекуперації енергії ковзання в мережу.

Основним недоліком привода цього типу є низький (що залежить від глибини регулювання швидкості) коефіцієнт потужності та зниження ККД у разі зміни моменту навантаження і ковзання.

Зважаючи, що для ЕП конвеєра властивий невеликий діапазон регулювання (приблизно 10% зміни швидкості) [19], то вибір АВК як виконавчого елемента є найбільш доцільним. Так, з одного боку, за умови такого діапазону регулювання ККД АВК зберігає високе значення, а, з іншого боку, привод на базі АВК дешевший, якщо порівнювати з іншими типами регульованого асинхронного електропривода.

3. Імпульсне керування асинхронним двигуном асинхронного вентиляльного каскаду

Розвиток напівпровідникової техніки дає змогу розглянути питання застосування імпульсного методу регулювання швидкості АД з фазним ротором [20]. У застосуванні цього методу керування можна регулювати швидкість у досить широких межах та отримувати необхідні механічні характеристики.

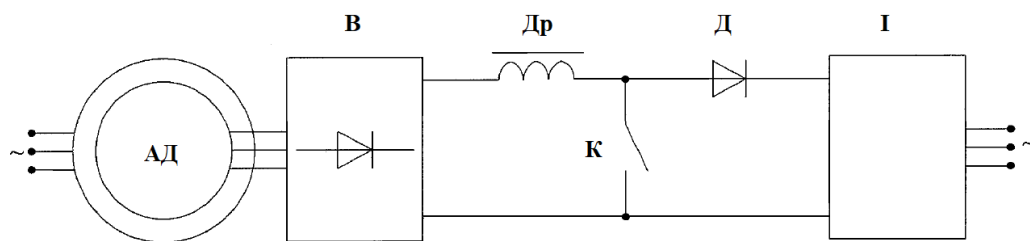


Рис. 1. Схема імпульсного керування АД АВК

Регулювання в подібних схемах здійснюється зміною відносної тривалості увімкнення, яка дорівнює:

$$\gamma = \frac{T - t_u}{T}, \quad (1)$$

де T – період повторення імпульсів; t_u – тривалість імпульсу, що відповідає часу вимкненого стану електронного ключа.

За умови імпульсного регулювання швидкості АД з фазним ротором доцільно застосовувати закон комутації з постійним часом вимкненого стану силового елемента ключа та змінною частотою [20]. Для такого закону комутації властиво $t_u = \text{const}$. Параметром системи в цьому разі є величина

$$\alpha = t_u / T_2, \quad (2)$$

де T_2 – постійна часу протягом другого інтервалу комутації.

Його значною перевагою є простота схем керування, швидкодія.

Принцип побудови систем з імпульсним регулюванням полягає в тому, що в роторне коло постійного струму (рис. 1) паралельно до перетворювального пристрою (I) встановлюється електронний ключ (K). Така схема дає змогу внаслідок зміни відносної тривалості увімкнення ключа регулювати швидкість обертання двигуна. Випрямляч (B) зібраний за трифазною мостовою схемою; згладжувальний дросель (Dr), зменшує пульсації струму. Щоб уникнути коротке замикання перетворювача, в його коло увімкнений захисний діод D .

Застосування імпульсного керування допомагає знизити габаритну потужність перетворювальних пристроїв і особливо доцільне в приводах із вентиляним навантаженням, для яких потужність перетворювача за будь-якого діапазону регулювання буде незначною [20]. Необхідно зауважити, що перетворювач може використовуватися для поліпшення загального коефіцієнта потужності й бути спільним для кількох каскадів.

Величина α має обиратися залежно від допустимого значення витрат і пульсацій у роторному колі постійного струму. У системах зі змінною частотою комутації витрати перемикання зменшуються пропорційно до зростання відносної тривалості увімкнення. Найбільш важким режимом роботи силових елементів за умови цього закону комутації є режим, що відповідає максимальній частоті комутації (тобто мінімальній швидкості обертання двигуна) та найбільшому навантаженню.

Схема заміщення системи в процесі імпульсного керування зображена на рис. 2.

Рівняння, що визначають роботу поданої схеми за умови довільного ковзання s АД, мають вигляд:

1) ключ замкнуто $0 \leq t \leq \gamma T$:

$$i + T_1 \frac{di}{dt} = I'; \quad (3)$$

2) ключ розімкнено $\gamma T \leq t \leq T$:

$$i + T_2 \frac{di}{dt} = I'', \quad (4)$$

де I' – граничне значення струму в разі заданого ковзання та $\gamma = 1$; I'' – граничне значення струму за умови заданого ковзання і $\gamma = 0$; T_1 – постійна часу кола впродовж першого інтервалу комутації; T_2 – постійна часу кола протягом другого інтервалу комутації.

Граничні значення струмів I' і I'' та постійні часу T_1 та T_2 визначаються таким чином:

$$I' = \frac{Es - \Delta U}{R_e s + R}, \quad (5)$$

$$T_1 = \frac{L}{R_e s + R}, \quad (6)$$

$$I'' = \frac{Es - \Delta U - E_u}{R_e s + R + R_u}, \quad (7)$$

$$T_2 = \frac{L}{R_e s + R + R_u}, \quad (8)$$

де R_e – еквівалентний омичний опір, що враховує зниження внутрішньої електрорушійної сили (ЕРС) внаслідок перекриття вентилів; R – активний опір двох фаз обмотки ротора; L – індуктивність реактора та індуктивність розсіювання двох фаз АД; E_u – проти-ЕРС інвертора; R_u – еквівалентний омичний опір; ΔU – пряме падіння напруги на захисному діоді та силовому елементі ключа.

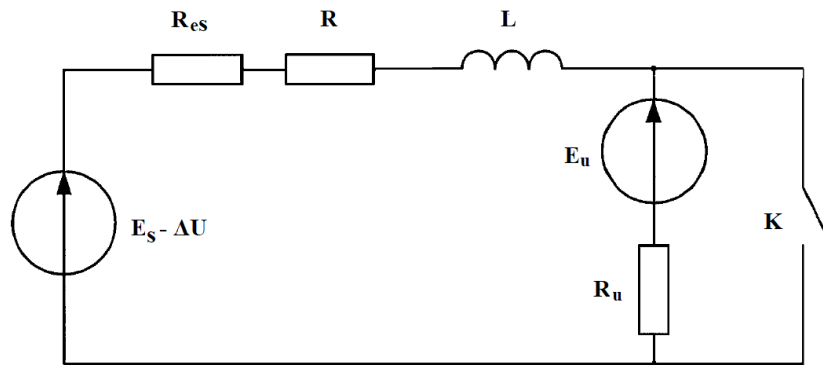


Рис. 2. Схема заміщення

Вираз для розмаху пульсацій струму в сталому режимі:

$$\Delta I = \frac{(I' - I'')(1 - e^{-\alpha\tau/(1-\gamma)})(1 - e^{-\alpha})}{1 - e^{-\alpha} \cdot e^{-\alpha\tau/(1-\gamma)}}, \quad (9)$$

де $\tau = T_2/T_1$, $\tau \leq 1$. (10)

Середнє значення струму в сталому режимі

$$I_{cp} = I'\gamma + I''(1-\gamma) - \Delta I \frac{(1-\gamma)(1-\tau)}{\alpha\tau}. \quad (11)$$

Пульсації струму максимальні за умови найбільшої γ і залежать від α, τ . Розкладаючи вираз для ΔI в ряд Тейлора та обмежуючись першими двома членами, що цілком допустимо за малих α , отримаємо для середнього значення струму

$$I_{cp} = \left(I'\gamma + \frac{I''}{\tau}(1-\gamma) \right) / \left(\gamma + \frac{1}{\tau}(1-\gamma) \right). \quad (12)$$

Вираз для розмаху пульсацій можна переписати так:

$$\frac{\Delta I}{I_{cp}} = \frac{[(Es - \Delta U)(1-\tau) + \tau E_u]\gamma\alpha}{Es - \Delta U - E_u(1-\gamma)}. \quad (13)$$

Якщо $\alpha < 0,1$, енергетичні показники імпульсної схеми практично не відрізняються від схем з безперервним керуванням [20].

Виразу (12) для середнього значення струму можна надати вигляду

$$I_{cp} = \frac{Es - \Delta U + E_u(1-\gamma)}{R_e s + R + R_u(1-\gamma)}. \quad (14)$$

Рівняння швидкісної характеристики $n = f(I_{cp})$

для АД з імпульсним регулюванням:

$$s = \frac{(E_u + I_{cp} R_u)(1-\gamma) + \Delta U + I_{cp} R}{E - I_{cp} R_e} \quad (15)$$

або

$$n = n_0 \left[1 - \frac{(E_u + I_{cp} R_u)(1-\gamma) + \Delta U + I_{cp} R}{E - I_{cp} R_e} \right], \quad (16)$$

де n_0 – швидкість ідеального холостого ходу; n – поточне значення швидкості обертання ротора.

Звідси випливає, що n пропорційно γ , тобто зміною γ – відносної тривалості увімкнення –

ми, відповідно, змінюємо швидкість обертання АД із фазним ротором. Робота на більшій швидкості досягається збільшенням відносної тривалості увімкнення ключа. Якщо $\gamma \rightarrow 1$, швидкісна характеристика наближається до природної. Нижня межа регулювання швидкості за умови $\gamma \rightarrow 0$ визначається внутрішньою ЕРС перетворювача; жорсткість швидкісних характеристик у разі малих γ погіршується. Якщо $R_u = 0$, характеристики паралельні одна одній. Діапазон регулювання швидкості за певних E_u , R_u залежить від зміни γ . За умови довільних відносних тривалостей ($0 < \gamma < 1$) ключ дає змогу наче плавно змінювати значення проти-ЕРС інвертора, що вводиться в коло ротора, від величини E_u до 0. Зазвичай для отримання верхньої та нижньої меж регулювання достатньо мати γ , відповідно, 0,95 і 0,05, тому що в цьому разі властивості практично збігаються з граничними характеристиками, якщо $\gamma = 1$ і $\gamma = 0$.

Залежність моменту АД від середнього значення струму випрямленого кола визначається так:

$$M = \frac{1}{\omega_0} E I_{cp} \left(1 - \frac{I_{cp} R_e}{E} \right), \quad (17)$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість ротора.

За допомогою формул (16) і (17) можна побудувати швидкісні та механічні характеристики АД за незмінної величини γ (рис. 3). У процесі імпульсного регулювання швидкості АД може працювати в тих самих режимах, що й звичайний каскад [20].

За умови імпульсного регулювання швидкості АД із фазним ротором за малих навантажень у роторному колі можливий режим переривчастих струмів.

У приграничній точці між безперервним і переривчастими режимами мінімальне значення струму періодичного процесу, що встановився, обертається в нуль.

Для середнього значення струму можна отримати такий вираз:

$$I_{cp} = I' \gamma + I'' (1 - \gamma) - \frac{(1 - \gamma)(1 - \tau)}{\alpha \tau} (1 - e^{-\alpha \tau / (1 - \gamma)}) I'. \quad (18)$$

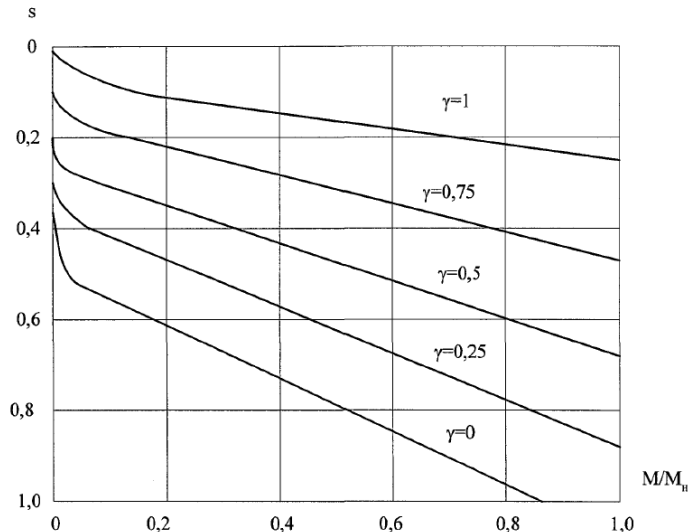


Рис. 3. Механічні характеристики АВК за умови імпульсного регулювання

Залежність моменту АД від середнього значення струму визначається за такою формулою:

$$M_{cp} = \frac{I_{cp} E}{\omega_0}. \quad (19)$$

Ковзання у відносних одиницях:

$$\varphi = 1 / \left(1 + \frac{1 - e^{-\alpha \tau / (1 - \gamma)}}{(e^\alpha - 1) \tau} \right); \quad (20)$$

$$M = \varphi \left[\tau + \gamma (1 - \tau) - \frac{(1 - \gamma)(1 - \tau)(1 - e^{-\alpha \tau / (1 - \gamma)})}{\alpha \tau} \right] - \tau (1 - \gamma), \quad (21)$$

де ковзання у відносних одиницях:

$$\varphi = (Es - \Delta U) / E_u ; \quad (22)$$

значення моменту двигуна у відносних одиницях:

$$M = \frac{M_{cp} R \omega_0}{EE_u}. \quad (23)$$

Рівняння (20) спільно з рівнянням (21) дає змогу визначити криві на площині φ , M , що обмежують ділянку безперервного струму. Якщо застосовувати наведені вирази, легко побудувати механічні характеристики в ділянці безперервного (за малих навантажень) і переривчастого струму.

Унаслідок розкладання експоненціальних членів у степеневий ряд отримаємо наближені рівняння для побудови механічних характеристик у ділянці переривчастих струмів:

$$\varphi_n = \varphi \frac{1 - \gamma_n}{1 - \gamma}, \quad (24)$$

$$M_n = (\varphi_n - 1 + \gamma_n) \tau, \quad (25)$$

де φ – ковзання у відносних одиницях на граничній кривій за умови заданих α , τ , γ .

У разі імпульсного регулювання швидкості АД значення коефіцієнта τ перебуває зазвичай

у межах 0,5–1,0; значення параметра α завжди можна отримати меншим ніж 0,4.

На рис. 4 наведена діаграма залежності φ від M для різних значень α (якщо $\tau = 1$), побудована за рівняннями:

$$\varphi = \frac{1 - e^{-\alpha}}{1 - e^{-\alpha/(1-\gamma)}}, \quad (26)$$

$$M = \varphi - 1 + \gamma. \quad (27)$$

Ліворуч від граничних кривих розташована ділянка переривчастого струму, праворуч – безперервного. На рис. 4 також побудовано механічні характеристики за умови $\alpha = 0,2$. Якщо $\tau = 1$, властивості близькі до прямолінійних, у разі $\tau < 1$ чіткіше спостерігається нелінійність механічних характеристик. У ділянці переривчастих струмів механічні характеристики мають значну крутість (особливо якщо малі γ).

Знаючи межі зміни моменту навантаження і користуючись наведеними виразами, можемо знайти необхідне значення параметра α , за якого двигун працює в режимі безперервного струму. Якщо $\alpha < 0,05$, режим переривчастих струмів практично вимикається [20].

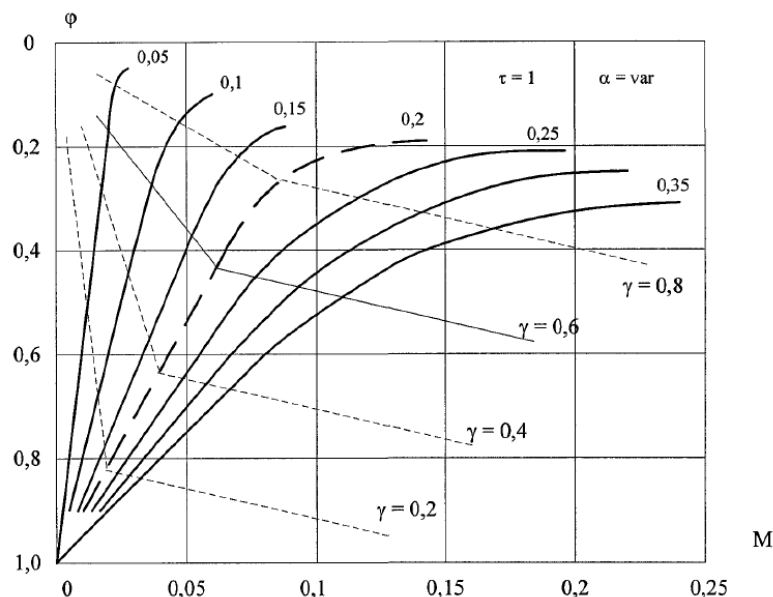


Рис. 4. Діаграма залежності φ від M за умови $\tau = 1$ та $\alpha = \text{var}$

Найбільш істотним недоліком асинхронного вентиляного каскаду, де регулювання здійснюється зміною кута випередження веденого інвертора, є низький коефіцієнт потужності.

Визначимо коефіцієнт спотворення та потужність спотворення інвертора. У процесі імпульсного

регулювання АД в інвертор надходять імпульси струму тривалістю t_u , які прямують один за одним через період T повторення імпульсів.

Діюче значення основної гармоніки струму мережної обмотки визначається як:

$$i_{1u} = \frac{2\sqrt{2}I_1 \sin(t_u/2)}{k_t \pi} \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT\right)^2}, \quad (28)$$

де k_t – коефіцієнт трансформації; I_1 – струм у вентильній обмотці трансформатора.

Діюче значення струму мережної обмотки визначається за формулою

$$i_{\partial u} = I_{1u} \sqrt{2t_u/3T}, \quad (29)$$

де

$$I_{1u} = I_1/k_t. \quad (30)$$

$$P_{uv} = 3U_1 I_{1u} \sqrt{\frac{2t_u}{3T} - \frac{4(1-\cos t_u)}{\pi^2}} \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT\right)^2}, \quad (32)$$

де U_1 – діюче значення фазової напруги мережі.

Потужність спотворення звичайного інвертора (кут перекриття вентилів не беремо до уваги) можна отримати з (32) за умови $t_u = T = 2\pi/3$:

$$P'_{uv} = 3U_1 I_{1u} \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{6}{\pi^2}}. \quad (33)$$

Отже, потужність спотворення інвертора, що працює в імпульсному режимі, виходить найменшою за великих γ , незважаючи на низький k_u ; потужність спотворення особливо збільшується на середніх швидкостях, а за умови $\gamma \rightarrow 0$ наближається до потужності спотворення звичайного інвертора.

Коефіцієнт спотворення в цьому разі дорівнює

$$k_u = \frac{2\sqrt{3T} \sin \frac{t_u}{2}}{\pi \sqrt{t_u}} \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT\right)^2}. \quad (31)$$

Потужність спотворення інвертора, що працює в імпульсному режимі, з огляду на вирази (28) та (29) дорівнює

Потужність спотворення інвертора, що працює в імпульсному режимі, залежить від навантаження на валу двигуна та коефіцієнта трансформації; у приводах малої та середньої потужності з вентильним навантаженням і невеликим діапазоном регулювання потужність спотворення буде незначною і не зможе помітно негативно впливати на мережу.

Кут зсуву фаз між основною гармонікою та напругою інвертора (рис. 5) дорівнює

$$\varphi_u = \beta + \psi_u, \quad (34)$$

де β – кут випередження інвертора; ψ_u – кут зсуву першої гармоніки щодо середини паузи фазового струму звичайного інвертора.

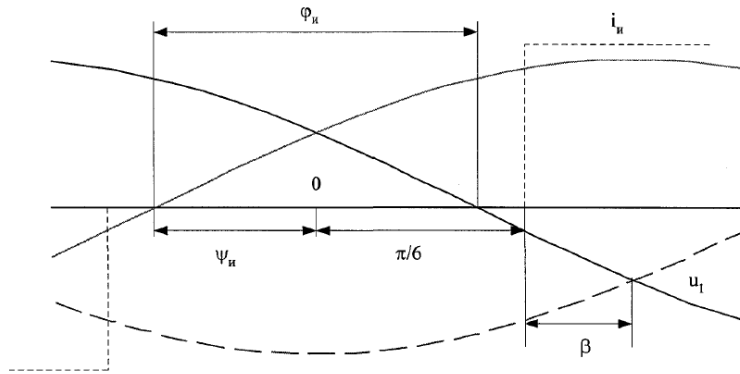


Рис. 5. Кут зсуву фаз

Активна потужність, що віддається інвертором у трифазну мережу, визначається активним складником

$$P_u = \frac{6}{\pi k_t} \sqrt{2} U_1 I_1 \sin \frac{t_u}{2} \cos(\beta + \psi_u) \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT\right)^2}. \quad (35)$$

Реактивна потужність

$$Q_u = \frac{6}{\pi k_t} \sqrt{2} U_1 I_1 \sin \frac{t_u}{2} \sin(\beta + \psi_u) \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT\right)^2}. \quad (36)$$

основної гармоніки струму мережної обмотки й за умови синусоїдальної первинної напруги дорівнює

$$P_u = \frac{6}{\pi k_t} \sqrt{2} U_1 I_1 \sin \frac{t_u}{2} \cos(\beta + \psi_u) \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT \right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT \right)^2}. \quad (35)$$

Реактивна потужність

$$Q_u = \frac{6}{\pi k_t} \sqrt{2} U_1 I_1 \sin \frac{t_u}{2} \sin(\beta + \psi_u) \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT \right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT \right)^2}. \quad (36)$$

Реактивна потужність звичайного інвертора з (36), якщо $t_u = \frac{2\pi}{3}$, дорівнює

$$Q_u' = \frac{6\sqrt{3/2}}{\pi k_t} U_1 I_1 \sin \frac{t_u}{2} \sin \beta'. \quad (37)$$

Відомо, що у звичайному вентиляльному каскаді коефіцієнт потужності виявляється низьким. Інвертор повертає активну потужність у мережу, тому активні потужності двигуна та інвертора віднімаються, а їх реактивні потужності складаються. У процесі роботи на високих швидкостях потужність звичайного інвертора майже повністю реактивна. Набагато меншою

буде реактивна потужність, що споживається інвертором під час імпульсного керування. Наприклад, найбільша реактивна потужність інвертора, що працює в імпульсному режимі, виходить приблизно в 25 разів меншою за реактивну потужність, що споживається звичайним інвертором.

Повна потужність обчислюється за формулою

$$S_u = \frac{3}{k_t} U_1 I_1 \sqrt{\frac{2t_u}{3T}}. \quad (38)$$

Відповідно до (35) і (38), що визначають активну та повну потужність інвертора, знаходимо власний коефіцієнт потужності інвертора:

$$\cos \varphi_u = \frac{2\sqrt{3T}}{\pi \sqrt{t_u}} \sin \frac{t_u}{2} \cos(\beta + \psi_u) \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT \right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT \right)^2} \quad (39)$$

або

$$\cos \varphi_u = k_u \cos(\beta + \psi_u). \quad (40)$$

Значні можливості для зниження енерговитрат і поліпшення енергетичних показників перетворювача властиві методу штучної комутації тиристорів [21]. За малих γ , незважаючи на деяке погіршення коефіцієнта спотворення, і за негативних значень кута β з боку змінного струму інвертора можна отримати випереджальний коефіцієнт потужності. У цьому разі для підвищення надійності необхідно, щоб інвертор мав схему штучної комутації; тут дуже перспективне застосування повністю керованих кремнієвих вентилів.

Керування перетворювачами зі штучною комутацією можливе в ділянці випереджальних кутів $(-\pi \leq \beta \leq 0)$, що перетворює ці пристрої зі споживачів в генератори реактивної потужності ємнісного характеру (компенсаційні перетворювачі).

Останній етап у розвитку перетворювачів зі штучною комутацією ознаменувався появою глибокорегульованих пристроїв, властивості яких роблять можливим їх застосування в широкій сфері техніки. Принципи побудови та керування перетворювачів із штучною комутацією можуть бути перенесені на ділянку перетворювальних схем, виконуваних на повністю керованих приладах, які на

цей час бурхливими темпами впроваджуються у сфері силової перетворювальної техніки [22].

До сучасних відомих і освоєних промисловістю силових напівпровідникових приладів цього типу належать: запірний тиристор (GTO), біполярний транзистор з ізольованим затвором (IGBT), запірний тиристор із вбудованою системою керування (IGCT) та їх модифікації.

Для GTO властиві такі переваги: здатність до керованого запирання; порівняно висока перевагуюча здатність; можливість послідовного з'єднання; робочі частоти до 250 Гц за умови напруги до 4 кВ. Недоліки: високі витрати в увімкненому стані; дуже значні витрати в системі керування; складні системи керування та подання енергії на потенціал; високі витрати на перемикання.

Переваги IGBT: здатність до керованого запирання; найвища робоча частота (до 10 кГц); проста неенергоємна система керування; вбудований драйвер. Недоліки: дуже високі витрати в увімкненому стані.

Переваги IGCT: здатність до керованого запирання; перевагуюча здатність та сама, що й у GTO; низькі витрати в увімкненому стані на перемикання; робоча частота – до одиниць кГц; вбудований блок керування (драйвер); можливість послідовного з'єднання. Недоліки: не виявлено через відсутність тривалого досвіду експлуатації.

За виразами, що визначають активну й реактивну потужності спотворення двигуна та інвертора, знаходимо коефіцієнт потужності АВК:

$$\cos \varphi_{ABK} = \frac{P_a - P_u}{\sqrt{(P_a - P_u)^2 + (Q \mp Q_u)^2 + (P_v - P_{uv})^2}} \quad (41)$$

За великих γ коефіцієнт потужності за умови імпульсного регулювання практично визначається власним коефіцієнтом потужності АД.

Висновки

У процесі дослідження проаналізовано підходи до керування електроприводом, що використовується як виконавчий елемент конвеєрних ліній. Визначено, що ефективність роботи конвеєрних систем суттєво підвищується за умови застосування регульованого електропривода на базі асинхронного двигуна з фазним ротором за схемою АВК. Цей пристрій забезпечує оптимальні режими роботи конвеєрної лінії, має високе значення ККД, і до того ж привод

на базі АВК дешевший порівняно з іншими типами регульованого асинхронного електропривода.

Запропоновано метод регулювання АД АВК, що оснований на імпульсному керуванні та дає змогу регулювати швидкість обертання за допомогою зміни частоти комутації електронного ключа, що закорочує інвертор, і водночас установлювати кути керування повністю керованими силовими елементами інвертора за умови їх штучної комутації для підтримки необхідного коефіцієнта зсуву. Це сприяє досягненню високого коефіцієнта потужності. Крім того, можливість використання одного інвертора для декількох виконавчих елементів знижує енерговитрати на привод.

Перспективи подальшого розвитку

У подальших дослідженнях планується здійснити аналіз і синтез системи автоматичного керування електроприводом конвеєрної лінії з огляду на збурювальні впливи й демпфування механічних коливань стрічки конвеєра.

Список літератури

1. Dunn William C. Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control. McGraw-Hill Book Co, 2018. 336 p. URL: <https://www.ebooks.com/en-us/book/96278766/fundamentals-of-industrial-instrumentation-and-process-control-2e-pb/william-c-dunn/>
2. Кишенько В. Д. Сучасні методи та моделі інтелектуальних систем керування. Київ: НУХТ, 2021. 252 с. URL: <https://drive.google.com/file/d/1YHidYjIMnPl6Exx58-lg4j7vYzYc0As3/view>
3. Автоматизація виробничих процесів / І. В. Ельперін та ін. Київ: Ліпа-К, 2017. 378 с. URL: <https://pupenasan.github.io/avpbook/>
4. Nevliudov I. Evolutions Of Group Management Development Of Mobile Robotic Platforms In Warehousing 4.0. / I. Nevliudov et al. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2021. № 4 (18). P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.057>
5. Dinolova P. Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations / P. Dinolova et al. *Energies*. 2023. Vol. 16, 7136. 26 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16207136>
6. Sengamalai U. Three Phase Induction Motor Drive: A Systematic Review on Dynamic Modeling, Parameter Estimation, and Control Schemes. / U. Sengamalai et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, 8260. 39 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15218260>
7. Єремєєв І. С., Кисельов В. Б. Автоматизовані системи управління технологічними процесами. Київ: Гельветика, 2022. 324 с. URL: https://knushop.com.ua/faculty/kibernetika?product_id=2317&sort=p.model&order=ASC
8. Турушин В. О., Федорченко В. В. Машини промислового транспорту безперервної дії. Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля, 2009. 134 с. URL: <https://www.twirpx.com>
9. Невлюдов І. Ш. Технічні засоби автоматизації / І. Ш. Невлюдов та ін. Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. 450 с. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/d9c8323a-0bca-44ed-83cb-f785872b19cb>
10. Diachenko O. An overview of the constructions of conveyors for moving bulk materials, comparison and study of their parameters / Diachenko O. et al. *Mining, Constructional, Road and Melioration Machines*. 2024. No. 103. P. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2024.103.0301>
11. Бондарев В. С. Підйомно-транспортні машини. Розрахунки підймальних і транспортувальних машин / В. С. Бондарев та ін. Київ: Вища шк., 2009. 734 с. URL: <https://f.eruditor.link/file/371876/>
12. Yevsieiev V. Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software Support / V. Yevsieiev et al. *Applied Mathematics & Information Sciences An International Journal*. 2023. Vol. 17, No. 6. P. 1073–1088. DOI: <https://doi.org/10.18576/amis/170615>
13. Nevliudov I. The "load balancing" and "adaptive task completion" algorithms implementation on a pharmaceutical sorting conveyor line / I. Nevliudov et al. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2024. No. 1 (27). P. 154–163. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.154>
14. Bortnowski P. Types and causes of damage to the conveyor belt-review, classification and mutual relations / P. Bortnowski et al. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Volume 140. 106520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106520>
15. Лавріненко Ю. М. Основи електропривода / Ю. М. Лавріненко та ін. Київ: Ліпа-К, 2017. 524 с. URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Lavrin_2009_504.pdf

20. Голодний І. М., Санченко О. В. Регульований асинхронний електропривод вентиляційної системи з широтно-імпульсним керуванням. Київ: ЦП "Компринт", 2020. 117 с. URL: <http://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/5617/1/Monographia%20Golodniy%D0%B9%202020.pdf>
21. Сенько В. І., Трубіщин К. В., Чибеліс В. І. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія. Київ: Ліра-К, 2020. 300 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0054410.pdf>
22. Регульований електропривод / І. М. Голодний та ін. Київ: ЦП "Компринт", 2015. 509 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56294/1/Elektropryvod.pdf>

References

1. Dunn, W. (2018), "Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control", McGraw-Hill Book Co, 336 p. available at: <https://www.ebooks.com/en-us/book/96278766/fundamentals-of-industrial-instrumentation-and-process-control-2e-pb/william-c-dunn/>
2. Kyshenko, V. (2021), "Modern methods and models of intelligent control systems" ["Suchasni metody ta modeli intelektualnykh system keruvannia"], NUKhT, Kyiv, 252 p. available at: <https://drive.google.com/file/d/1YHidYjIMnPl6Exx58-lg4j7vYzYc0As3/view>
3. Elperin, I., Pupena, O., Sidletskyi, V., Shved, S. (2017), "Automation of production processes" ["Avtomatyzatsiia vyrobnychkh protsesiv"], Lira-K, Kyiv, 378 p. available at: <https://pupenasan.github.io/avpbook/>
4. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Klymenko, O., Demska, N., Vzhesnievskyi, M. (2021), "Evolutions of Group Management Development of Mobile Robotic Platforms in Warehousing 4.0", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, № 4 (18), P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.057>
5. Dinolova, P., Ruseva, V., Dinolov, O. (2023), "Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations", *Energies*, Vol. 16, 7136, 26 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16207136>
6. Sengamalai, U., Anbazhagan, G., Thamizh Thentral, T.M., Vishnuram, P., Khurshaid, T., Kamel, S. (2022), "Three Phase Induction Motor Drive: A Systematic Review on Dynamic Modeling, Parameter Estimation, and Control Schemes", *Energies*, Vol. 15, 8260, 39 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15218260>
7. Yermieiev, I., Kyselov, V. (2022), "Automated control systems of technological processes" ["Avtomatyzovani systemy upravlinnia tekhnolohichnymy protsesamy"], Vydavnychiy dim "Helvetyka", Kyiv, 324 p. available at: https://knushop.com.ua/faculty/kibernetika?product_id=2317&sort=p.model&order=ASC
8. Turushyn, V., Fedorchenko, V. (2009), "Continuous industrial transport machines" ["Mashyny promyslovoho transportu bezperervnoi dii"], Vydavnytstvo SNU im. V. Dalia, Luhansk, 134 p. available at: <https://www.twirpx.com>
9. Nevliudov, I., Andrushevych, A., Demska, N., Novoselov, S. (2019), "Technical means of automation" ["Tekhnichni zasoby avtomatyzatsii"], Kryvorizkyi koledzh NAU, Kryvyi Rih, 450 p. available at: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/d9c8323a-0bca-44ed-83cb-f785872b19cb>
10. Diachenko, O., Delembovskyi, M., Levchuk, K., Protyven O. (2024), "An overview of the constructions of conveyors for moving bulk materials, comparison and study of their parameters", *Constructional, Road and Melioration Machines*, No. 103, P. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2024.103.0301>
11. Bondariev, V., Dubynets, O., Kolisnyk, M. (2009), "Lifting and transport machines. Calculations of lifting and transport machines" ["Pidimno-transportni mashyny. Rozrakhunky pidiimalnykh i transportovalnykh mashyn"], Vyscha shkola, Kyiv, 734 p. available at: <https://f.eruditor.link/file/371876/>
12. Yevsieiev, V., Nevliudov, I., Maksymova, S., Omarov, M., Klymenko, O. (2023), "Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software", *Applied Mathematics & Information Sciences an International Journal*, Vol. 17, No. 6, P. 1073–1088. DOI: <https://doi.org/10.18576/amis/170615>
13. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Klymenko, O. (2024), "The "load balancing" and "adaptive task completion" algorithms implementation on a pharmaceutical sorting conveyor line", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1(27), P. 154–163. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.154>
14. Bortnowski, P., Kawalec, W., Król, R., Ozdoba, M. (2022), "Types and causes of damage to the conveyor belt-review, classification and mutual relations", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 140, 106520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106520>
15. Lavrinenko, Yu., Savchenko, P., Syniavskyi, O., Voitiuk, D., Savchenko, V., Holodnyi, I. (2017), "Basics of an electric drive" ["Osnovy elektropryvoda"], Lira-K, Kyiv, 524 p. available at: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Lavrin_2009_504.pdf
16. Vovk, O., Kvitka, S., Halko, S., Strebkov, O. (2019), "Energy-Saving Control of Asynchronous Electric Motors for Driving Working Machines", *Modern Development Paths of Agricultural Production*, Springer, Cham, P. 415–423. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43
17. Esam, H., Ali, Ahmed J., Shanshal, Abdullah K. (2024), "Performance improvement of squirrel cage induction motor: A review paper", *Proceedings of the 4th International conference on sustainable engineering techniques (ICSET)*, Volume 3105, Issue 1, 15 p. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0212317>
18. Chermalykh, O., Danilin, O., Bosak, A., Toropova, L. (2021), "Automated electric drive of machines and installations" ["Avtomatyzovani elektropryvod mashyn ta ustanovok"], KPI im. Ihoria Sikorskoho, Kyiv, 60 p. available at: <https://ela.kpi.ua/Avtomatyzovanyi2021>
19. Voskoboinyk, V., Borodai, V., Borovyk, R., Nesterova, O. (2021), "Basics of the electric drive of production machines and complexes" ["Osnovy elektropryvoda vyrobnychkh mashyn ta kompleksiv"], Natsionalnyi TU "Dniprovska politehnika", Dnipro, 254 p. available at: https://elprivod.nmu.org.ua/files/automaticED/Посібник_основи_електропривода_2029.01.2021.pdf

20. Holodnyi, I., Sanchenko, O. (2020), "Adjustable asynchronous electric drive of the ventilation system with pulse-width control" ["Rehulovanyi asynkhronnyi elektropyvod ventyliatsiinoi systemy z shyrotno-impulsnym keruvanniam"], TOV "TsP "Kompyrnt", Kyiv, 117 p. available at: <http://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/5617/1/Monographia%20Golodniy%D0%B9%202020.pdf>
21. Senko, V., Trubitsyn, K., Chybelis, V. (2020), "Inverters and frequency converters: monograph" ["Inventory i peretvoriuvachi chastoty: monohrafiia"], Lira-K, Kyiv, 300 p. available at: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0054410.pdf>
22. Holodnyi, I., Lavrinenko, Yu., Kozyrskyi, V., Chervinskyi, L., Abduramanov, D., Toropov, A., Sanchenko, O. (2015), "Adjustable electric drive" ["Rehulovanyi elektropyvod"], TOV "TsP "Kompyrnt", Kyiv, 509 p. available at: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56294/1/Elektropyvod.pdf>

Надійшла (Received) 20.11.24

Відомості про авторів / About the Authors

Ляшенко Олексій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, декан факультету комп'ютерної інженерії та управління, Харків, Україна; e-mail: oleksii.liashenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0146-3934>

Стародубцев Микола Григорович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: nikolaj.starodubcev@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7856-5771>

Макаренко Геннадій Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: hennadii.makarenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-9840-1219>

Пашенко Олександр Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: oleksandr.pashchenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-5244-5925>

Liashenko Oleksii – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Dean of Faculty of Computer Engineering and Control, Kharkiv, Ukraine.

Starodubcev Nikolaj – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

Makarenko Hennadii – Kharkiv National University of Radio Electronics, Graduate Student, Kharkiv, Ukraine.

Pashchenko Aleksandr – Graduate Student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

CONTROL OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF CONVEYOR LINES

The **subject** of research is a method of controlling the speed of an asynchronous motor, connected according to the scheme of an asynchronous-valve stage, which increases the power factor of the drive and positively affects the power system as a whole. The **purpose** of the work is to develop and study methods of controlling electromechanical systems based on an asynchronous electric drive, which provide highly efficient operation of conveyor lines implemented on their basis as elements of complex technological equipment of an automated process control system. The article solves the following **problems**: analysis of conveyor line control tasks within the integrated automated process control system of production systems; analysis of actuating elements of conveyor lines electric drive; development of a method for regulating the speed of an asynchronous motor connected according to the circuit of an asynchronous-valve stage. The **methodology** of the work is based on the methods of the theory of electrical machines, the theory of the electric drive, numerous and analytical methods for solving differential equations, the theory of modeling. The **results** of the work include a method of controlling the speed of an asynchronous motor, based on the implementation of pulse control, characterized by the ability to maintain control angles of fully controlled power semiconductor elements to achieve a high power factor and change the frequency of turning on the power element of the electronic key that short-circuits the inverter. Influence of duration of relative duration of key commutation on performance element characteristics is investigated. **Conclusions.** Thus, the use of the proposed method of pulse control of the electric drive allows to expand the upper limit of speed control, increase the efficiency and power factor of the electric drive, reduce the inductance of the smoothing choke

Keywords: robotic systems; transport shuttle; conveyor line; automated control; induction motor.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Ляшенко О. С., Стародубцев М. Г., Макаренко Г. С., Пашенко О. С. Керування електромеханічними системами конвеєрних ліній. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 85–96. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.085>

Liashenko, O., Starodubcev, N., Makarenko, H., Pashchenko, A. (2024), "Control of electromechanical systems of conveyor lines", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 85–96. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.085>