

Для обґрунтування доцільності застосування конкретного електроприводу розроблено автоматизовану систему для порівняння кранових електроприводів з урахуванням співвідношення статичних і динамічних режимів, навантаження і моментів інерції, а також відносного часу роботи зі зниженими швидкостями. Проведено порівняння втрат електроенергії за певне число циклів

Ключові слова: електропривод, CAD-система техніко-економічного порівняння, резисторне керування, перетворювач напруги, перетворювач частоти

Для обґрунтування целесообразности применения конкретного электропривода разработана автоматизированная система для технико-экономического сопоставления крановых электроприводов с учетом соотношения статических и динамических режимов, нагрузки, моментов инерции, а также относительного времени работы на пониженной скорости. Проведено сравнение потерь электроэнергии за определенное число циклов

Ключевые слова: электропривод, CAD-система технико-экономического сравнения, резисторное управление, преобразователь напряжения, преобразователь частоты

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ПОРІВНЯННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ КРАНОВИХ МЕХАНІЗМІВ

В. В. Бушер

Доктор технічних наук, професор*
E-mail: victor.v.bousher@gmail.com

С. П. Савич

Кандидат технічних наук, доцент**
E-mail: savichsp@gmail.com

С. Л. Савич

Кандидат технічних наук, доцент***
E-mail: savychsl@gmail.com

В. С. Медведєв****

E-mail: vadic95@gmail.com

*Кафедра електромеханічних систем з комп'ютерним управлінням*****

Кафедра електропостачання і енергоменеджменту***

Кафедра технології неорганічних речовин і екології**

****Кафедра електропостачання і енергоменеджменту*****

*****Одеський національний політехнічний університет
пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044

1. Вступ

Експлуатаційна якість роботи кранових механізмів, їх продуктивність, а також проблема енергозбереження в значній мірі залежить від електропривода.

Основним типом регульованого приводу є частотно-регульований асинхронний електропривод – система «перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ПЧ-АД). Однак поряд з цим електроприводом в деяких випадках для вирішення окремих виробничих завдань застосовується система «перетворювач напруги – асинхронний двигун» (ПН-АД). В експлуатації також знаходяться електроприводи на основі асинхронних двигунів з фазовим ротором, регульовані за допомогою зміни додаткових опорів в роторних ланцюгах, система реостатного регулювання – «реостатне регулювання – асинхронний двигун». До складу кранових механізмів таких електроприводів входить особливо багато. Для кількісної оцінки вибору в енергоспоживанні при заміні, наприклад, електроприводу з фазним ротором системою ПЧ-АД необхідно розглянути економічну ефективність використання всіх систем регульованих асинхронних приводів. Широке застосування регульованих електроприводів привело до того, що сучасний електропривід є енергосиловою основою, яка доз-

воляє забезпечити виробничі механізми необхідною механічною енергією. Промисловий електропривод споживає за різними оцінками 60–70 % від усієї виробленої електроенергії. У зв'язку з зростанням цін на електроенергію та обмеженими можливостями збільшення потужності енергогенеруючих установок проблема зниження електроспоживання є актуальною задачею.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Один із шляхів енергозбереження – це вибір більш досконалої з енергетичної точки зору системи електроприводу [1]. Втрати енергії в перехідних режимах зменшуються при застосуванні частотно-регульованих електроприводів замість реостатного регулювання та систем ПН-АД. Завданням проектувальника є грамотний і всебічно обґрунтований вибір конкретно технічного рішення.

Частотний перетворювач в комплекті з асинхронним електродвигуном дозволяє повністю замінити електродвигун постійного струму. Основний недолік асинхронних електродвигунів – складність регулювання їх швидкості традиційними методами

(введенням додаткових опорів в ланцюги обмоток, зміною напруги живлення). При живленні від мережі зі стабільною частотою двигун має сталу швидкість, близьку до синхронної, яка внаслідок високої жорсткості механічної характеристики мало залежить від моменту навантаження.

Принцип частотного методу регулювання швидкості асинхронного двигуна полягає в тому, що, змінюючи частоту живлячої напруги, можна при незмінному числі пар полюсів регулювати кутову швидкість магнітного поля статора, а тому і швидкість ротора. Завдяки цьому механічні характеристики мають високу жорсткість в широкому діапазоні швидкості [2]. Регулювання швидкості при цьому не супроводжується збільшенням ковзання асинхронного двигуна, тому втрати потужності при регулюванні незначні. Для отримання високих енергетичних показників асинхронного двигуна – коефіцієнтів потужності, косинусної дії, перевантажувальної здатності – необхідно одночасно з частотою змінювати і амплітуду напруги. Закон зміни напруги залежить від характеру моменту навантаження.

Регулювання частоти обертання виконавчих механізмів можна здійснювати за допомогою різних пристроїв, але зараз використовуються виключно статичні перетворювачі частоти. Останні є найбільш досконалими пристроями управління асинхронним приводом у даний час. Ще недавно розвиток частотно-регульованого електропривода стримувався високою вартістю перетворювачів частоти. Але після виробництва силових схем з IGBT-транзисторами розробка високопродуктивних мікропроцесорних систем керування дозволило різним фірмам Європи, США, Японії та Росії створити сучасні перетворювачі частоти доступної вартості [3].

Більшість сучасних перетворювачів частоти побудовано за схемою подвійного перетворення [4].

Технологічні вимоги до електроприводів механізмів підйомних кранів вимагають реалізації гальмівних режимів роботи електропривода [5].

Це відноситься і до регульованих електроприводів змінного струму за системою ПЧ-АД. Сучасні перетворювачі частоти побудовані на основі застосування силових IGBT-транзисторів з використанням для управління мікропроцесорних програмованих пристроїв, пропонують для виконання цього режиму кілька можливих варіантів. Так, можливо використовувати резистивне гальмування, тобто гальмування з розсіюванням генерованої енергії в двигуні та в додатковому гальмівному резисторі. Однак з техніко-економічних міркувань бажано використовувати рекуперативне гальмування, тобто гальмування з поверненням енергії в живильну мережу [6]. З такою структурою створюються електроприводи в діапазоні потужностей 1–500 кВт. Це пояснюється тим, що система з некеріваним випрямлячем не споживає реактивної потужності, а вищі гармонічні струму не перевищують 30 % від першої гармонічної. Тому втрати потужності в АД збільшуються в середньому лише на 5–8 % порівняно з живленням від ідеальної синусоїдальної мережі. Тому загальний ККД перетворювача частоти в цьому разі досягає 95–97 % [2].

Рекуперативне гальмування виявляється особливо вигідним при значній потужності електроприво-

да [6]. При цьому реалізація рекуперативного гальмування АД вимагає додаткових капітальних витрат, але при цьому зменшуються річні експлуатаційні витрати за рахунок повернення частини енергії гальмування; необхідність такого додаткового рекуператора в кожному конкретному випадку визначається техніко-економічним розрахунком. Тому рекуперативне гальмування доцільно застосувати для тих кранових електроприводів, які працюють здебільшого в перехідних режимах (механізми повороту), або для тих механізмів підйому, які часто спускають вантаж, близький до номінального.

Режим рекуперативного гальмування електропривода з віддачею енергії в живильну мережу реалізується перетворювачами частоти серій ACS611, ACS617 і ACS800-17 фірми ABB чи аналогічними перетворювачами частоти серії SINAMICS або SIMOVERT MASTER DRIVERS VC (відрізок серії AFE) фірми SIMENS. Ці перетворювачі мають у своєму складі два трифазних шестипульсних моста на IGBT-транзисторах і відповідні фільтри, що забезпечує надійну рекуперацію енергії асинхронного електродвигуна в мережу.

Незважаючи на все ще значну вартість сучасних перетворювачів частоти, можна очікувати в ряді випадків досить швидко окупність вкладених коштів за рахунок економії енергоресурсів та інших складових ефективності [7, 8]. Використання цього обладнання – вигідний об'єкт для інвестування коштів підприємства [9].

Більшість кранових механізмів (зокрема, механізмів підйому) обладнано асинхронними двигунами з фазним ротором. Процес пуску здійснюється за характеристиками реостатного управління, коли з ротора дискретно виводяться ступені опору. У багатьох випадках гальмування крана здійснюється за рахунок використання режиму протиковлючення двигуна [10]. Часті перемикання з рухового в гальмівний режим при підході до заданої точки зупину механізму переміщення крана призводять до виникнення максимальних ударних моментів двигуна, прискореного виходу його з ладу може скоротити термін безаварійної роботи.

Режим зниженої швидкості забезпечується введенням в ротор опорів, що пов'язано зі зростанням ковзання двигуна і збільшенням електричних втрат [11].

Системи ПН-АД, забезпечуючи плавний пуск асинхронних двигунів (системи Soft-Start), можуть застосовуватися і для зниження енергоспоживання при роботі недовантажених двигуна в зоні номінальної швидкості. У цьому випадку за рахунок збільшення кута відкриття вентилів, що входять в ПН, знижується перша гармоніка напруги і асинхронний двигун при заданому моменті статичного навантаження працює на регульовальній характеристиці при швидкості дещо меншою, ніж на природній характеристиці. Такий режим призводить до зменшення сумарних втрат в АД і споживаної активної потужності [12, 13].

Дослідження зниження споживання електроенергії проведено в роботах [14–16]. Але при проведенні цих досліджень не враховуються особливості технологічного процесу кранових механізмів, режими їх роботи [17, 18]. Для обґрунтування доцільності застосування конкретного електропривода для кранових механізмів бажано розробити автоматизовану систему для порівняння кранових електроприводів з урахуван-

ням співвідношення статичних і динамічних режимів, навантаження і моментів інерції, а також відносного часу роботи зі зниженими швидкостями [19]. Проблема полягає у відсутності конкретних рекомендацій щодо використання альтернативних електроприводів для кранів. Актуальним завданням є визначення доцільності використання того чи іншого електропривода для кранів за показниками економічної ефективності [2]. Таким чином, розглядаючи всі можливості конкретного альтернативного електропривода, його переваги і недоліки відносно інших електроприводів при роботі кранових механізмів в заданих умовах експлуатації, слід довести необхідність або небажаність його використання.

3. Мета і задачі дослідження

Метою роботи є створення САД-системи техніко-економічного порівняння і обґрунтування вибору асинхронних електроприводів кранових механізмів з урахуванням технологічного циклу, споживання і втрат електроенергії протягом року.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язувались наступні задачі:

- розробка методики розрахунку споживання електроенергії різними типами електроприводів кранових механізмів в різноманітних умовах їх експлуатації, втрат енергії в статичних і динамічних режимах за певну кількість циклів в залежності від тривалості роботи на знижених швидкостях. Порівняння проводилось для кранових електроприводів з реостатним регулюванням, тиристорними перетворювачами напруги для двигунів з фазним ротором і перетворювачами частоти з або без блоку рекуперації для короткозамкнених двигунів;
- проведення аналізу споживання електроенергії при експлуатації різних електроприводів;
- розробка програми розрахунку енергії, яка дозволяє оперативно робити висновок про доцільність застосування оптимального електропривода в конкретних умовах експлуатації кранового механізму.

4. Енергетичні показники асинхронних електроприводів. Розрахунок енергії, що споживається альтернативними електроприводами механізмів підйому

Значна кількість кранових електроприводів з реостатним регулюванням в ланцюзі ротора працює зі значним недовантаженням, що призводить до великих втрат, особливо враховуючи втрати ковзання при зниженій швидкості. Саме тому для кранових механізмів бажано перевірити доцільність використання сучасних регульованих електроприводів змінного струму за критерієм, зокрема, зниження втрат у двигуні. Втрати в механічній передачі звичайно враховуються через ККД.

Сумарні змінні втрати для асинхронного двигуна (АД) [20] – це сума відповідних втрат в ланцюгах ротора і статора:

$$\Delta P_{3M} = M \omega_0 s \left(1 + \frac{R_1}{R_{2\Sigma}} \right), \quad (1)$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість, s – відносне ковзання, R_1 , $R_{2\Sigma}$ – активні опори статора і зведені обмотки

ротора і додаткових резисторів, тобто ці втрати пропорційні електромагнітному моменту і перепаду швидкості при цьому моменті.

Постійні втрати в АД включають втрати в сталі, механічні, а також в обмотці статора від протікання струму намагнічування I_0 :

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{ст1}} + \Delta P_{\text{ст2}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_0. \quad (2)$$

Але всі постійні втрати в сучасних електроприводах дійсно не є постійними, бо вони залежать від швидкості ω , напруги U і частоти f .

Механічні втрати приймають пропорційними квадрату поточної швидкості ω [20]

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{мех.н}} \frac{\omega^2}{\omega_{\text{н}}^2}, \quad (3)$$

де $\Delta P_{\text{мех.н}}$ – механічні втрати при номінальній швидкості $\omega_{\text{н}}$.

Втрати від протікання струму намагнічування I_0 можна виразити таким чином [20]:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{0.н} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2, \quad (4)$$

тобто вони залежать від квадрата магнітного потоку АД. В (4) $\Delta P_{0.н}$ – номінальні втрати від струму намагнічування.

Втрати в сталі АД можна розрахувати за наступною формулою, якщо вважати [20] $\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \approx \frac{U}{U_{\text{н}}}$:

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст.н}} \left(\frac{U}{U_{\text{н}}} \right)^2 \left(\frac{f}{f_{\text{н}}} \right)^{1.3} (1 + s^{1.3}). \quad (5)$$

В останніх формулах s , ω , U та f – поточні значення ковзання, швидкості, напруги та частоти відповідно. В них використовуються також складові номінальних втрат АД, які доцільно розраховувати, користуючись лише каталожними даними двигуна.

При роботі з номінальними частотою, напругою і швидкістю (з номінальним ковзанням $s_{\text{н}}$), коли розвивається номінальний момент $M=M_{\text{н}}$, мають місце і номінальні втрати в двигуні:

$$\Delta P_{\text{н}} = 3U_{1\text{н}} I_{1\text{н}} \cos \phi_{\text{н}} - P_{\text{н}}, \quad (6)$$

де $U_{1\text{н}}$, $I_{1\text{н}}$ та $\cos \phi_{\text{н}}$ – номінальні фазні напруга, струм і коефіцієнт потужності, $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність.

Формулами (3)–(5) можна користуватись для розрахунку втрат в ланцюгах двигуна, який працює в сталому режимі.

Відомо, що сумарні втрати енергії в АД можливо визначити за формулою (7)

$$\Delta A = \int_0^{t_{\text{н.п}}} 3I_2^2 (R_1 + R_{2\Sigma}') dt. \quad (7)$$

Завдяки тому, що в перехідних режимах струми двигуна і відповідно втрати, як правило, значно більше за номінальні, тому в цих режимах звичайно обмежуються розгляданням лише змінних втрат, тому що вони значно більші за постійні, які складають 5% від загальних втрат [20].

Якщо використовується електропривод, коли перехідні процеси здійснюються без зміни ω_0 (реостатне

регулювання або система ПН-АД), а навантаження відсутнє ($M_c=0$), сумарні втрати

$$\Delta A = \int_{s_k}^{s_{поч}} J \omega_0^2 s \left(1 + \frac{R_1}{R_{2\Sigma}} \right) ds, \quad (8)$$

де J – загальний момент інерції електропривода, $s_{поч}$ і s_k – початкове і кінцеве значення ковзання відповідно перехідного режиму.

В загальному випадку при переході від початкової швидкості $\omega_{поч}$ ($s_{поч}$) до кінцевої $\omega_k(s_k)$ при використанні цих електроприводів, якщо $M_c=0$, втрати в АД можна розрахувати за формулою:

$$\Delta A = J \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_{2\Sigma}} \right) (s_{поч}^2 - s_k^2). \quad (9)$$

Наприклад, при пуску, якщо вважати $s_{поч}=1, s_k=0$,

$$\Delta A_{п} = J \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_{2\Sigma}} \right). \quad (10)$$

Тобто із збільшенням опору роторного ланцюга зменшуються втрати в статорі. Але головне – ці втрати пропорційні кінетичній енергії, яка накопичується під час розгону.

В перехідних процесах з $\omega_0=const$ момент двигуна не залишається постійним. Тому для визначення втрат енергії в перехідних процесах, коли є навантаження (а в кранових механізмах $M_c=const$), домовимось вважати момент двигуна постійним; останній визначається середнім значенням $M=M_{сеп}$, [20]

$$M_{дин} = M_{сеп} - M_c = const, \quad (11)$$

а при гальмуванні

$$M_{дин} = -M_{сеп} - M_c = const. \quad (12)$$

Тому і прискорення $\epsilon = \frac{M_{дин}}{J} = const$.

Тепер на відміну від (10) під час пуску, враховуючи (11)

$$\Delta A_{п} = J \frac{M_{сеп}}{M_{дин}} \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_{2\Sigma}} \right), \quad (13)$$

що еквівалентно пуску без навантаження зі збільшеним моментом інерції.

Аналогічно при гальмуванні, враховуючи (12)

$$\Delta A_{п} = 3J \frac{M_{сеп}}{M_{дин}} \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_{2\Sigma}} \right). \quad (14)$$

Тепер вже процес вважається еквівалентним гальмуванню без навантаження, але зі зменшеним моментом інерції.

На відміну від електропривода, коли значення ω_0 задається стрибком і тому завдяки великим ковзанням (особливо на початку перехідних процесів) втрати досить значні, для частотного електропривода є можливість плавного завдання ω_0 регулюванням частоти за певним законом. Останнє має знизити поточне ковзання двигуна, а тому і втрати.

В загальному випадку втрати енергії в перехідному процесі, якщо плавно змінюється керуюча дія,

$$\Delta A = A_1 - A_2 = \int_0^{t_{п.п}} M(t) \omega_0(t) dt - \int_0^{t_{п.п}} M(t) \omega(t) dt, \quad (15)$$

тут A_1 і A_2 – споживана електромагнітна і повна механічна енергія за час перехідного процесу $t_{п.п}$. Отримати конкретні вирази для загального випадку дуже важко, тому обмежимося найбільш розповсюдженим законом – лінійним завданням швидкості неробочого ходу

$$\omega_0 = \omega_{0.поч} + \epsilon_0 t,$$

де прискорення

$$\epsilon_0 = \frac{\omega_{ок} - \omega_{0.поч}}{t_0},$$

де $\omega_{0.поч}$ і $\omega_{ок}$ – початкове і кінцеве значення швидкості неробочого ходу, а t_0 – час лінійної зміни цієї швидкості.

Будемо вважати, що АД, який живиться від частотного перетворювача, в перехідному режимі завжди працює на лінійній частині механічної характеристики (коли $s_a < s_{ка}$), тоді момент двигуна є функцією абсолютного ковзання і частоти. Для цього випадку втрати за час перехідного процесу

$$\Delta A = \pm J \frac{M_{сеп}}{M_{дин}} \Delta \omega (\omega_{ок} - \omega_{0п}), \quad (16)$$

де $\Delta \omega$ – падіння швидкості в перехідному режимі, викликане статичним і динамічним моментами. Далі вважатиме $M_c=const$ і при пуску $\omega_{0п}=0$, тоді

$$\Delta \omega = \frac{M_c + J \epsilon_0}{\beta} = \frac{M_c}{\beta} + \frac{\omega_{ок}}{t_0} T_M.$$

Так зокрема, під час пуску АД, коли $M_c=0$, можна отримати вираз:

$$\Delta A_{п} = J \frac{\omega_{ок}^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_{2\Sigma}} \right) \frac{2T_M}{t_0}. \quad (17)$$

З останнього видно, що при відносно повільному завданні ω_0 під час частотного пуску, коли $t_0 > T_M$, втрати енергії можуть бути значно знижені відносно втрат при прямому пуску, коли $\omega_0=const$ (10). Звичайно $t_0 \geq 10T_M$, тобто в цьому разі можна зменшити втрати у 5 і більше разів [15].

Аналогічні вирази для втрат можна отримати, коли $M_c \neq 0$.

Тоді у зв'язку з тим, що динамічний момент під час пуску позитивний (11), а під час гальмування – від'ємний (12), величина $\Delta \omega$ теж буде різною, тому і втрати енергії при пуску і гальмуванні, звичайно, неоднакові.

Величину $J \frac{M_{сеп}}{M_{дин}}$ у (16) необхідно розглядати як еквівалентний момент інерції, зумовлений дією як статичного, так і динамічного моментів. Тоді втрати енергії у всіх випадках можливо уявити собі як втрати енергії при роботі без навантаження, але зі збільшеним моментом інерції при розгоні та зменшеним – при гальмуванні.

5. Розрахунок енергії, що споживається альтернативними електроприводами механізмів підйому

Електроприводи кранових механізмів підйому працюють головним чином у стаціонарних режимах; тривалість перехідних процесів занадто мала, тому втратами енергії в цих режимах при попередніх розрахунках допустимо нехтувати.

Розглядаючи окремі електроприводи механізмів підйому, необхідно зіставити втрати в ланцюгах двигуна і в його обмотках для певного робочого циклу електропривода. Це допоможе порівняти їх енергетичні спроможності, а також нагрівання двигуна в цьому режимі.

При роботі на низьких швидкостях в реостатній системі регулювання та в системі ПН-АД у ланцюгу ротора необхідно ввести додаткові резистори для виводу більшої частини втрат ковзання за межі електричної машини, щоб зменшити її нагрівання. Величина опору додаткового резистора забезпечує роботу двигуна в заданій точці з координатами M і ω . Але при використанні системи ПН-АД цей вибір неоднозначний. Так, зменшення $R_{\text{дод}}$ збільшує змінні втрати ΔP_m , але втрати у сталі машини при цьому стають меншими, бо відповідно зменшується необхідна напруга. Тому загальні втрати суттєво збільшуються лише при надмірно зменшеному опорі резисторів. Попередні розрахунки засвідчують, що бажана штучна характеристика може перетинати вісь абсцис при моменті, який на 35–45 % більше за номінальне статичне навантаження (для механізму підйому таке навантаження відповідає моменту номінального вантажу).

При використанні електропривода ПН-АД для роботи з заданим опором додаткових резисторів у роторі $R'_{2\text{дод}}$ втрати залежать від напруги U_i і ковзання s_i у відповідних точках. Напругу в кожній з цих точок можна розрахувати через номінальну напругу $U_{1н}$

$$U_{1н} = U_i \sqrt{\frac{M_i}{M_p}}, \quad (18)$$

де M_i і M_p – моменти двигуна при знижених і номінальній напрузі на реостатних характеристиках і відповідних ковзаннях.

Втрати розраховуються за допомогою формул (1), (3)–(5), в яких вважаємо $f=f_{1н}$, а $\frac{\Phi_i}{\Phi_{1н}} = \frac{U_i}{U_{1н}}$.

При реостатному регулюванні напруга залишається постійною $U=\text{const}$. Тому в цьому випадку формули для визначення втрат залишаються тими ж, якщо в них вважатимемо $U_i=U_{1н}$, а в (4) $\Phi=\Phi_{1н}$.

Аналогічно розраховуємо втрати при роботі двигуна з перетворювачем частоти ПЧ-АД [20]. Тоді можна використовувати АД з короткозамкненим ротором, але для коректного співставлення, крім того, беремо той самий двигун з фазним ротором і примусово замикаємо його кільця. Так робиться часто і в реальних умовах, коли необхідно переобладнати реостатну систему на більш сучасну (ПЧ-АД). Тепер вже слід розрахувати відповідну частоту, яка забезпечить роботу в заданій точці з координатами ω , M_i . Вважаючи нахил характеристики для забезпечення конкретної швидкості ω_i такою ж, як природна, розраховуємо відносно ковзання для заданої конкретної швидкості ω_i

$$s = \frac{\Delta\omega}{\omega_i + \Delta\omega},$$

де $\Delta\omega$ – падіння швидкості при відповідному моменті на природній характеристиці.

Синхронна швидкість характеристики для іншої частоти f_i , яка забезпечує необхідну швидкість ω_i ,

$$\omega_{0i} = \frac{\omega_i}{1-s}.$$

Тепер розраховуємо необхідну частоту

$$f_i = \frac{\omega_{0i}}{\omega_0} f_{1н}, \quad (19)$$

де ω_0 – синхронна швидкість природної характеристики, $f_{1н}$ – номінальна частота живлячої мережі.

Для більшості кранових механізмів, як було вже визначено, діапазон регулювання швидкості не перевищує 10:1, тому вважаємо, що напругу необхідно змінювати пропорційно частоті:

$$U_i = \frac{f_i}{f_{1н}} U_{1н}. \quad (20)$$

Далі розраховуємо втрати: в міді статора і ротора по аналогії з (1)

$$\Delta P_{M_i} = M\omega_{0i}s_i \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right), \quad (21)$$

де R_2' – тільки зведений опір ротора.

Втрати в сталі двигуна залежать від ковзання, напруги, яка змінюється, як і раніше, а також від частоти (5). Однак при роботі на лінійній ділянці механічної характеристики ковзання незначне у всьому діапазоні зміни швидкості, тому втратами в сталі ротора нехтують. Тоді при регулюванні за законом (20), використовуючи (5), отримаємо

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{стн} \left(\frac{f}{f_{1н}} \right)^{3,3}. \quad (22)$$

Відомо, що втрати при неробочому ході згідно з (4)

$$\Delta P_{0i} \equiv \Phi^2,$$

але при частотному регулюванні, як це видно з (20), $\frac{U}{f} = \text{const}$ тому можна вважати $\Phi = \text{const}$ і $\Delta P_{0i} = \Delta P_{0н} = \text{const}$. Як і раніше, механічні втрати розраховуємо за формулою (3).

Таким чином, сумарні втрати потужності

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_c + \Delta P_0 + \Delta P_{\text{мех}}, \quad (23)$$

а електричної енергії за цикл –

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i, \quad (24)$$

де ΔP_i – втрати потужності під час роботи t_i на відповідному етапі (всього в циклі n етапів).

Далі необхідно розрахувати споживання корисної енергії при роботі механізму у кожній точці статичного режиму і сумарну. Розглянемо декілька можливостей.

1. При роботі електропривода в режимі двигуна (I та III квадранти) до втрат у колі двигуна ΔP_i слід додати потужність (енергію) корисної роботи ($M_i\omega_i$) з урахуванням ККД механізму η_M і двигуна η_d та врахувати втрати в ПН або ПЧ через ККД відповідного перетворювача $\eta_{ПЧ}$. Для цього потужність, яка споживається з мережі в кожній робочій точці режиму двигуна, можливо розрахувати наступним чином:

$$P_i = \left(\frac{M_i\omega_i}{\eta_d\eta_M} + \Delta P_i \right) \frac{1}{\eta_{ПЧ}}. \quad (25)$$

2. В гальмівному режимі (II, IV квадранти) механічна робота (потужність), яка виконується механіз-

мом, передається на вал двигуна і далі або частково передається в мережу (за винятком втрат), або втрачається у резисторах.

Тут можливі деякі варіанти. Якщо використовується електропривод з реостатним регулюванням або система ПН-АД по схемі з 10 тиристорами, то робота на природній характеристиці в режимі рекуперативного гальмування допускає передачу енергії у мережу. Таке ж повернення енергії до мережі відбувається, якщо електропривод по системі ПЧ-АД працює на будь-якій характеристиці в II або IV квадрантах, а рекуперация здійснюється завдяки спеціальному рекуператору. Тоді загальна потужність споживається з мережі

$$P_i = (-M_i \omega_i \eta_m \eta_d + \Delta P_i) \frac{1}{\eta_{II}}, \quad (26)$$

якщо вираз в скобках (26) позитивний (втрати в двигуні більші за вироблену механічну потужність), або віддається в мережу

$$P_i = (-M_i \omega_i \eta_m \eta_d + \Delta P_i) \eta_{II}, \quad (27)$$

якщо цей вираз від'ємний, тобто енергія, що генерується завдяки роботі механізму, більша за втрати в двигуні.

Але якщо електропривод з реостатним регулюванням або в системі ПН-АД працює на будь-якій штучній характеристиці в II або IV квадрантах (крім природної), тобто в режимі противмикання, вся потужність (енергія), яка виробляється механізмом, втрачається в обмотках двигуна та додаткових резисторах. Аналогічна ситуація складається при використанні системи ПЧ-АД без рекуператора, коли вся енергія, що генерується двигуном за рахунок кінетичної енергії вантажу, включаючи роботу на природній характеристиці, гаситься на спеціальному гальмівному резисторі. В цьому випадку потужність, яка споживається з мережі, необхідна лише для компенсації втрат

$$P_i = (-M_i \omega_i \eta_m + \Delta P_i) \frac{1}{\eta_{II}}, \quad (28)$$

якщо вираз в скобках позитивний. Але якщо він негативний, обмін енергії з мережею не відбувається ($P_i = 0$).

В усіх випадках при використанні реостатного регулювання, коли будь-який перетворювач відсутній, у формулах (25)–(28) вважаємо $\eta_{II} = 1$.

Таким чином, якщо електропривод допускає рекуперацию енергії, то її споживання за весь цикл може суттєво знизитись.

Зробимо попереднє співставлення за енергетичними показниками (споживання електроенергії) трьох електроприводів для певного циклу роботи механізму підйому. Для прикладу спочатку використовується асинхронний двигун з фазним ротором типу 4МТФ(Н)160Л6, $P_n = 11,0$ кВт, $U_n = 220/380$ В, $n_n = 910$ об/хв, $(\omega_n = 95,25 \text{ c}^{-1})$, $I_{1n} = 32$ А. Для електропривода ПЧ-АД далі будемо використовувати також відповідний короткозамкнений

двигун. Задані для цього прикладу робочі точки циклу (режими роботи) наведено на рис. 1. Увесь робочий час класичного циклу t_p представляємо з таких восьми режимів: підйом і спуск з номінальною та зниженою швидкістю номінального вантажу та порожнього гака. Так, підйому номінального вантажу на природній характеристиці I (коли двигун розвиває номінальний момент M_n) відповідає точка 1, рис. 1, те ж – зі швидкістю $0,1 \omega_0$ (т. 1'); спуск того ж вантажу на природній характеристиці II, коли двигун розвиває момент $0,85 M_n$ (т. 2), те саме – зі швидкістю $-0,1 \omega_0$ (т. 2'). Аналогічно підйом і спуск порожнього гака на природних характеристиках I і II, коли двигун розвиває моменти $0,1 M_n$ (т. 3) і $-0,1 M_n$ (т. 4), а також з низькою швидкістю $\omega = 0,1 \omega_0$ (т. 3') і $-0,1 \omega_0$ (т. 4').

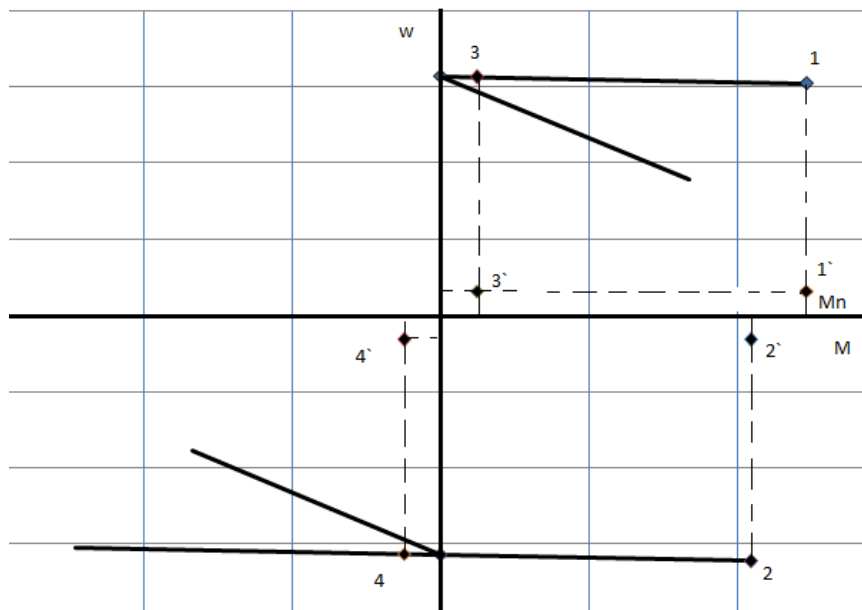


Рис. 1. Задані робочі режими циклу: точка 1 (M_n, ω_n); точка 2 ($0,85 M_n, -\omega_n$); точка 3 ($0,1 M_n, \omega_n$); точка 4 ($-0,1 M_n, -\omega_n$); точка 1' ($M_n, 0,1 \omega_n$); точка 2' ($0,85 M_n, -0,1 \omega_n$); точка 3' ($0,1 M_n, 0,1 \omega_n$); точка 4' ($0,1 M_n, -0,1 \omega_n$)

Реостатна характеристика III використовується для роботи на знижених швидкостях в системі ПН-АД, коли резистори вмикаються в ланцюг ротора для виведення втрат ковзання за межі двигуна. Вона створює момент, відповідно до прийнятих раніше рекомендацій, на 40 % більше від моменту при підйомі номінального вантажу. Штучні характеристики IV, V, VI і VII (1) забезпечують роботу реостатного електропривода на знижених швидкостях. Характеристики VIII і IX – це ідеальні характеристики, які забезпечують знижені швидкості в системах електропривода ПН-АД і ПЧ-АД.

Вважаємо для нашого випадку, що кожна з операцій підйому і спуску номінального вантажу і порожнього гака триває 20 с. Це відповідає механізму з номінальною швидкістю 1 м/с і висотою підйому – спуску 20 м. Тобто робочий час циклу $t_p = 80$ с. Далі розглянемо різні варіанти, коли у т. 1'–4' двигун працює 5 % (загальний час 4 с), 10 % (8 с) або 20 % (16 с) робочого часу t_p . Якщо вважати тривалість включення механізму підйому $T_B = 40$ %, то час циклу $t_n = 200$ с. Необхідно оцінити різницю споживання електроенергії при роботі електроприводів реостатного, ПН-АД і ПЧ-АД за 1 годину (18 циклів) і протягом року, якщо

середньорічне число годин роботи кранових механізмів прийняти 3000, що саме стосується порталних перевантажувальних кранів.

При розрахунку енергії, що споживається з мережі або віддається до неї, приймаємо ККД механізму при роботі з навантаженням, близьким до номінального (т. т. 1 і 2), $\eta_{\text{мех.}}=0,85$; а в точках 3 і 4, де виконується робота з недовантаженням, $\eta_{\text{мех.}}=0,45$. Аналогічно для двигуна, коли він працює з навантаженням 60–100 % від номінального, його ККД залишається приблизно однаковим і на цей випадок приймаємо $\eta_{\text{дв.}}=0,9$. Але при суттєвому зменшенні навантаження (т. т. 3 і 4) він становить вже $\eta_{\text{дв.}}=0,6$.

Спочатку наводимо результати розрахунків при роботі у всіх 8 режимах кожного циклу (рис. 1). В табл. 1 наведені результати розрахунків споживання електроенергії вищезгаданим двигуном потужністю 11 кВт за один цикл і за рік для різних видів електроприводів механізму підйому, причому розглянуто два

варіанти системи ПЧ-АД: без рекуперації і з функцією рекуперації.

Отже, з графіків, наведених на рис. 2 можна зробити висновок, що, як і очікувалось, найбільш економічною є система електропривода ПЧ-АД у випадку використання короткозамкненого двигуна. Для наочності нижче наведена порівняльна таблиця загального відносного споживання електроенергії при роботі крана, коли цикл складається з 8 режимів.

Аналогічні розрахунки виконані для циклу, коли знижена швидкість використовується лише під час спуску номінального вантажу (реалізовано режим точка 2 на рис. 1).

Для цього випадку кінцеві результати розрахунків наведені в табл. 4, 5, а також на графіках рис. 3 для двигуна потужністю 11 кВт.

В табл. 6 наведено дані загального відносного споживання електроенергії при роботі крана, коли цикл складається з 5 режимів.

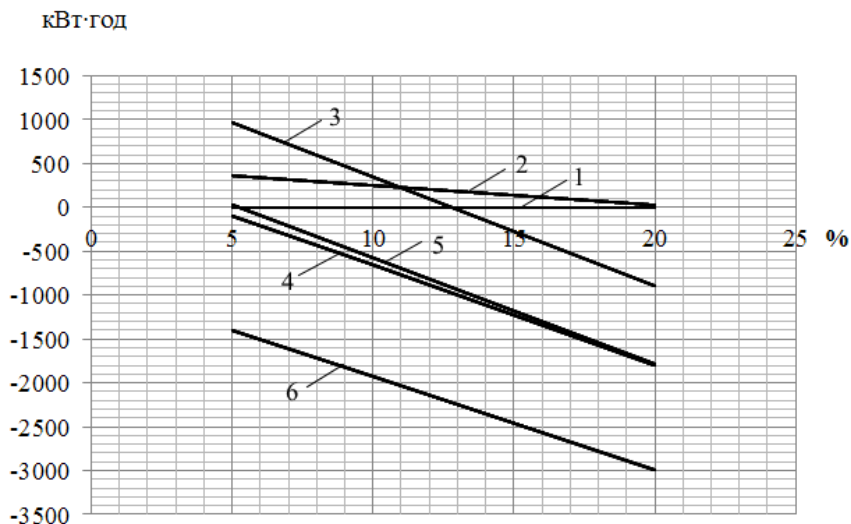


Рис. 2. Різниця загального споживання електроенергії різними електроприводами в порівнянні з реостатним (у циклі 8 режимів, двигун 11 кВт): 1 — реостатне регулювання; 2 — ПЧ-АД; 3 — ПЧ-АД без рекуперації (фазний двигун); 4 — ПЧ-АД з рекуперацією (фазний двигун); 5 — ПЧ-АД без рекуперації (короткозамкнений двигун); 6 — ПЧ-АД з рекуперацією (короткозамкнений двигун)

Таблиця 1

Загальне споживання електроенергії різними електроприводами для двигуна потужністю 11 кВт, кВт-год

Відн. час роб. на зниж. шв.		Реостат. регулювання (фаз. двигун типу 4МТФ(Н)160L6)	ПН-АД (фаз. двигун типу 4МТФ(Н)160L6)	ПЧ-АД без рекуперації (фаз. двигун типу 4МТФ(Н)160L6)	ПЧ-АД з рекуперацією (фаз. двигун типу 4МТФ(Н)160L6)	ПЧ-АД без рекуперації (к. з. двигун типу 4МТКФ(Н)160L6)	ПЧ-АД з рекуперацією (к. з. двигун типу 4МТКФ(Н)160L6)
		5 %	1 цикл (200 с)	0,1713	0,1780	0,1893	0,1696
	3000 год	9 251	9 614	10 222	9 156	9 278	7 846
10 %	1 цикл (200 с)	0,1753	0,1800	0,1818	0,1631	0,1647	0,1395
	3000 год	9 468	9 721	9 817	8 807	8 891	7 535
20 %	1 цикл (200 с)	0,1834	0,1840	0,1668	0,1501	0,1503	0,1280
	3000 год	9 903	9 937	9 005	8 108	8 118	6 912

Таблиця 2

Різниця споживання електроенергії різними електроприводами в порівнянні з реостатним, кВт-год

		Реостат. регулювання (фаз. двигун типу 4MTF(H)160L6)	ПН-АД (фаз. двигун типу 4MTF(H)160L6)	ПЧ-АД без рекуперації (фаз. двигун типу 4MTF(H)160L6)	ПЧ-АД з рекуперацією (фаз. двигун типу 4MTF(H)160L6)	ПЧ-АД без рекуперації (к. з. двигун типу 4MT- KF(H)160L6)	ПЧ-АД з рекуперацією (к. з. двигун типу 4MT- KF(H)160L6)
Відн. час роб. на зниж. шв.		5 %					
Цикл 200 с	За рік (3000 год)	0	362	971	-95	27	-1 405
Відн. час роб. на зниж. шв.		10 %					
Цикл 200 с	За рік (3000 год)	0	253	348	-662	-577	-1 934
Відн. час роб. на зниж. шв.		20 %					
Цикл 200 с	За рік (3000 год.)	0	34	-897	-1 795	-1 785	-2 991

Таблиця 3

Загальне відносне споживання електроенергії (у циклі 8 режимів), %

Тип електроприводу	відносний час роботи на зниженій швидкості								
	5 %			10 %			20 %		
Потужність електродвигуна, кВт	11	22	30	11	22	30	11	22	30
Реостатне регулювання	100			100			100		
ПЧ-АД без рекупер. (к. з. двигун)	100,3	113	113	94	106	108	82	93,5	94,5
ПЧ-АД з рекупер. (к. з. двигун)	85	90	92	80	85	86	70	75	76

Таблиця 4

Загальне споживання електроенергії різними електроприводами для двигуна потужністю 11 кВт, кВт-год

Відн. час роб. на зниж. шв.		Реостат. регулювання (фаз. двигун типу 4MTF(H)160L6)	ПН-АД (фаз. двигун типу 4MTF(H)160L6)	ПЧ-АД без рекуперації (фаз. двигун типу 4MTF(H)160L6)	ПЧ- АД з рекуперацією (фаз. двигун типу 4MTF(H)160L6)	ПЧ- АД без рекуперації (к. з. двигун типу 4MTKF(H)160L6)	ПЧ-АД з рекуперацією (к. з. двигун типу 4MTKF(H)160L6)
5 %	1 цикл (200 с)	0,1726	0,1815	0,1972	0,1775	0,1792	0,1527
	3000 год.	9 323	9 801	10 651	9 585	9 677	8 245
10 %	1 цикл (200 с)	0,1780	0,1870	0,1977	0,1790	0,1794	0,1543
	3000 год.	9 612	10096	10 673	9 663	9 689	8 333
20 %	1 цикл (200 с)	0,1887	0,1979	0,1985	0,1819	0,1799	0,1575
	3000 год.	10 190	10 686	10 719	9 821	9 714	8 508

Таблиця 5

Різниця споживання електроенергії різними електроприводами в порівнянні з реостатним, кВт·год

		Реостат. регулювання (фаз. двигун типу 4МТФ(Н)160L6)	ПН-АД (фаз. двигун типу 4МТФ(Н)160L6)	ПЧ-АД без рекуперації (фаз. двигун типу 4МТФ(Н)160L6)	ПЧ-АД з рекуперацією (фаз. двигун типу 4МТФ(Н)160L6)	ПЧ-АД без рекуперації (к. з. двигун типу 4МТКФ(Н)160L6)	ПЧ-АД з рекуперацією (к. з. двигун типу 4МТКФ(Н)160L6)
Відн. час роб. на зниж. шв.		5 %					
Цикл 200 с	За рік (3000 год)	0	478	1 328	262	354	-1 108
Відн. час роб. на зниж. шв.		10 %					
Цикл 200 с	За рік (3000 год)	0	484	1061	51	77	-1 279
Відн. час роб. на зниж. шв.		20 %					
Цикл 200 с	За рік (3000 год)	0	496	529	-369	-477	-1 682

Таблиця 6

Загальне відносне споживання електроенергії (у циклі 5 режимів), %

Тип електроприводу	відносний час роботи на зниженій швидкості								
	5 %			10 %			20 %		
Потужність електродвигуна, кВт	11	22	30	11	22	30	11	22	30
Реостатне регулювання	100			100			100		
ПЧ-АД без рек. (к. з. двигун)	104	116	119	101	112	115	95	105	107
ПЧ-АД з рек. (к. з. двигун)	88	93	95	86,7	91	93	83	87	89,5

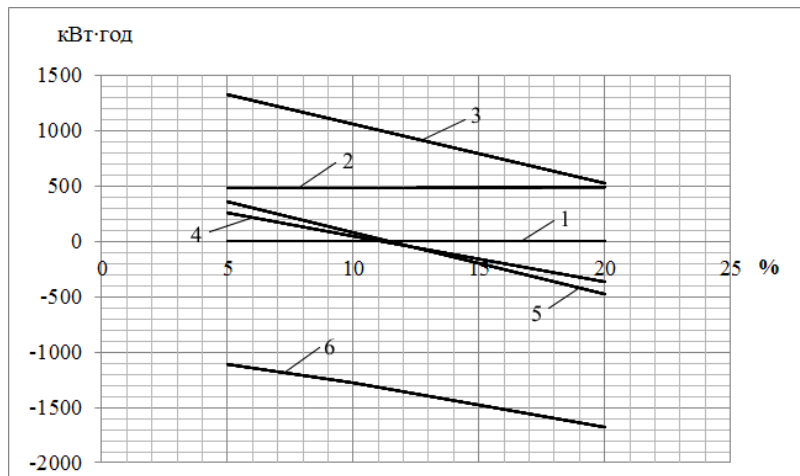


Рис. 3. Різниця загального споживання електроенергії різними електроприводами в порівнянні з реостатним (у циклі 5 режимів, двигун 11 кВт): 1 – реостатне регулювання; 2 – ПН-АД; 3 – ПЧ-АД без рекуперації (фазний двигун); 4 – ПЧ-АД з рекуперації (фазний двигун); 5 – ПЧ-АД без рекуперації (короткозамкнений двигун); 6 – ПЧ-АД з рекуперації (короткозамкнений двигун)

Тепер вже можна проводити розрахунок економії коштів за рік після заміни реостатного регулювання електроприводами ПЧ-АД з рекуперацією енергії або без неї [21]. Для цього визначаються вартість звичайного частотного перетворювача та перетворювача з модулем рекуперації, які рекомендуються деякими фірмами (SIEMENS і SCHNEIDER ELECTRIC) [22–23].

При використанні перетворювача частоти потрібен також фільтр в контурі постійного струму і гальмівний резистор. Для використання системи ПЧ-АД з рекуперацією енергії потрібен додатково модуль

рекуперації і фільтр мережі. Цікаво, що за даними SCHNEIDER ELECTRIC вартість рекуперації стає менше відповідного перетворювача лише тоді, коли потужність електропривода більше 40–50 кВт. А фірма SIEMENS випускає перетворювачі зі вмонтованим модулем рекуперації і фільтром, тому в цілому такі перетворювачі дешевше за перетворювачі з рекупераційним модулем фірми SCHNEIDER ELECTRIC.

Далі можуть бути розраховані терміни окупності перетворювачів частоти звичайних та з модулями рекуперації. Вважаючи вартість електроенергії в Україні 1,91 грн/кВт·год, а число годин роботи механізму під-

йому за рік 3000, термін окупності розраховується за формулою

$$T=K/V, \tag{29}$$

де V – вартість заощадженої за рік електроенергії (грн), K – вартість додаткового обладнання.

На базі наведених в попередніх розділах теоретичних розробок, необхідних для розрахунку втрат корисної електроенергії для заданого циклу конкретного механізму, поставлена задача розробки програми для розрахунку електроенергії, що споживається різними електроприводами, яка може бути підставою для обчислення можливої економії електроенергії, а також терміну окупності електропривода ПЧ-АД.

Для цього було розроблено САД-систему техніко-економічного порівняння електроприводів кранових механізмів, яка надає змогу провести аналіз ефективності використання різних електроприводів для кранових механізмів підйому незалежно від їх потужності.

При виборі середовища програмування для вирішення поставленої задачі було прийнято створювати програму в середовищі Microsoft Visual Basic for Application, (VBA), бо це поєднання однієї з найпростіших мов програмування і всіх обчислювальних можливостей такої багатогранної системи, як Excel. За допомогою VBA можна легко і швидко створювати різні додатки, навіть не

будучи фахівцем в області програмування. VBA містить відносно потужне графічне середовище, що дозволяє начисто конструювати екранні форми і управляючі елементи. Завдяки цьому Visual Basic for Application дозволяє з легкістю вирішувати багато завдань.

Найбільш складна задача в розробці програми полягає в уніфікації підходів до аналізу режимів роботи кранових механізмів і систем електропривода, тому що механізми підйому, в основному, працюють в статичному режимі, а в механізмах повороту – навпаки. Тому для кожного типу електропривода дана програма проводить розрахунок затрат електроенергії в статичному і в динамічному режимах.

З урахуванням всіх необхідних даних для розрахунку створено інтерфейс програми, який представлено на рис. 4. Він розподілений на декілька робочих вікон: вихідні дані двигунів з фазним і короткозамкненим ротором однакового типорозміру. Якщо двигуни присутні у довідковій базі даних (лист Excel «Motors»), то необхідно задати лише типи двигунів, тоді всі технічні дані їх з'являться автоматично. Далі вказують тривалість усталеного руху в циклі, кількість циклів на рік, відносне навантаження і відносні сумарні моменти інерції механізму для кожного режиму (робочої точки). Останній рядок (Calculate) визначає, які з режимів (точки 1, 2, 3, 4 на рис. 1) присутні в циклі і для яких з них можлива зменшена швидкість руху (точки 1', 2', 3', 4').

Technical data of the induction motor									
With the phase-wound rotor					With the short-circuited rotor				
Description	Variable	Value		Description	Variable	Value			
Type	Type	4MTH225M8		Type	Type	4MTKH225M8			
U _{1n} , V	U _{1n}	220		U _{1n} , V	U _{1n}	220			
P _n , W	P _n	30000		P _n , W	P _n	30000			
n _{nom} , rpm	n _{nom}	720		n _{nom} , rpm	n _{nom}	700			
cos(φ _n)	cos _{fin}	0.72		cos(φ _n)	cos _{fin}	0.77			
I _{1n} , A	I _{1n}	74.6		I _{1n} , A	I _{1n}	68.0			
I ₀ , A	I ₀	46.7		I ₀ , A	I ₀	38.8			
R ₁ / X ₁ , Ohm	R ₁ / X ₁	0.140	0.230	R ₁ , Ohm	R ₁	0.140			
R ₂ / X _{2'} , Ohm	R ₂ / X ₂	0.051	0.420	R _{2'} , Ohm	R ₂	0.310			
R _{2'} , Ohm	R ₂	0.084		R _{sc} ' / X _{sc} ', Ohm	R _{sc} / X _{sc}	0.450	0.570		
M _{max} , Nm	M _{max}	1030		M _{max} , Nm	M _{max}	1128			
pole pairs	p	4		pole pairs	p	4			
J _d , kgm ²	J _d	1.070		J _d , kgm ²	J _d	1.070			
Cycle duration in statlcal mode	tc, s	50							
Number of cycles per year	nc	54000							
Work point		1	1'	2	2'	3	3'	4	4'
 Mc* 		1	1	0.85	0.85	0.15	0.15	0.1	0.1
JmΣ*		0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05
Calculate		1	1	1	1	1	1	1	1




Рис. 4. Інтерфейс вікна вихідних даних програми

Вікно результатів розрахунку складається також з декількох ділянок. На першій вказано втрати електроенергії в статичних і динамічних режимах протягом циклу, тривалість динамічних режимів, а також сумарні втрати кожного з електроприводів для трьох значень відносного часу роботи зі зниженою швидкістю. Отримані результати зведені в таблицю, в якій порівняно втрати в електроприводах з обраним за базовий привод з реостатним регулюванням.

Результати з цієї таблиці у вигляді графіків (рис. 5) з лінійними трендами $t_{cycle} / t_{cycle} = \text{до } 30\%$ надають можливість виявити залежність втрат від часу роботи на зниженій швидкості для будь-якого t_{cycle} / t_{cycle} .

Виявляється, що в механізмах підйому кранів з часом роботи на зниженій швидкості $< 10\%$ можливість рекуперації під час спуску вантажу з номінальною швидкістю в найпростішому реостатному електроприводі робить цей привод більш економічним, ніж привод з регулюванням напруги і частоти без рекуператора.

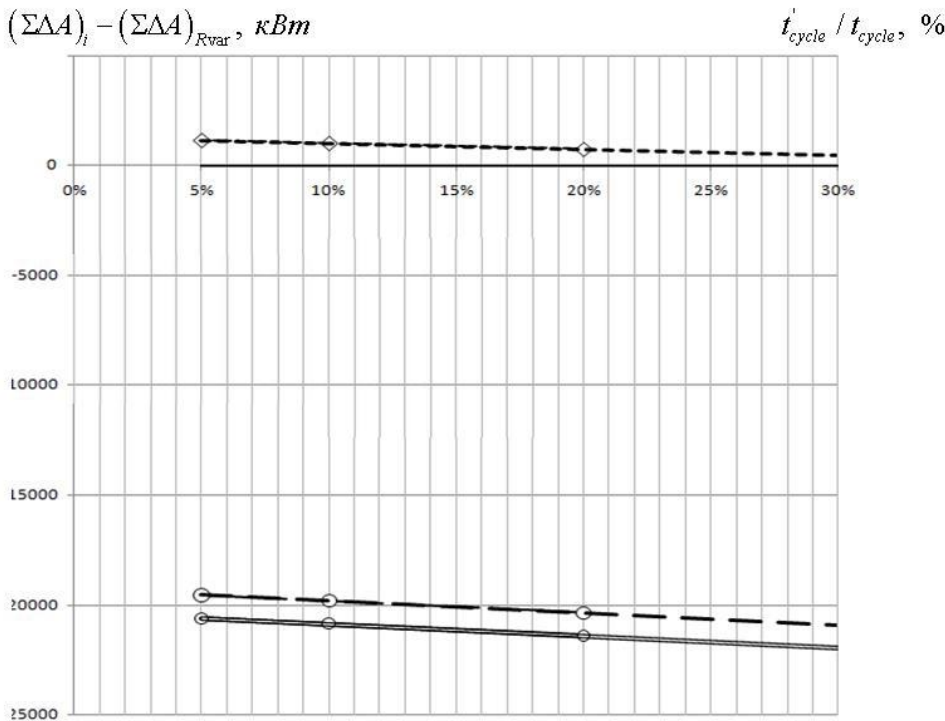


Рис. 5. Графічне зображення різниці загального споживання електроенергії різними електроприводами в порівнянні з реостатним регулюванням:
 R_{var} — реостатне регулювання; $-\diamond-$ — ПН-АД;
 $-\circ-$ — ПЧ-АД без рекуперації; \bullet — ПЧ-АД з рекуперацією

6. Обговорення результатів порівняння економічної ефективності використання різних видів електроприводів кранових механізмів підйому

З табл. 3 видно, що при роботі електропривода з ПЧ-АД з можливою рекуперацією енергії в мережу економія електроенергії по відношенню до реостатного регулювання є найбільшою і становить, наприклад, для двигуна потужністю 11 кВт 15–30 % в залежності від значення відносного часу роботи на зниженій швидкості (зі збільшенням відносного часу роботи на зниженій швидкості зростає економія електроенергії). У випадку роботи частотного перетворювача без ре-

куператора економія електроенергії значно менша, а саме для того ж самого двигуна при відносному часі роботи на зниженій швидкості 10 % вона становить 6 %, в той час, коли використовується рекуператор – 20 %. Важливим є також те, що з ростом потужності двигуна економія електроенергії зменшується, наприклад для системи ПЧ-АД з рекуперацією при відносному часі роботи на зниженій швидкості 10 % для двигуна потужністю 11 кВт економія становить 20 %, а для двигуна потужністю 30 кВт – 14 %. В табл. 6 наведено дані загального відносного споживання електроенергії при роботі крана, коли цикл складається з 5 режимів.

Порівнюючи дані таблиць 3 та 6, можна зробити висновки, що економія електричної енергії в останньому випадку значно знижується. Наприклад, для двигуна потужністю 11 кВт при роботі електропривода з ПЧ-АД з можливою рекуперацією енергії в мережу економія електроенергії становить вже 11–17 %, що майже в 2 рази менше, ніж при роботі у циклі з 8 режимів (15–30 %). До того ж, при збільшенні потужності двигуна економія також зменшується, а саме для двигуна 22 кВт вона становить 7–13 %, для двигуна 30 кВт – 4–11 % в залежності від значення відносного часу роботи на зниженій швидкості (зі збільшенням відносного часу роботи на зниженій швидкості економія електроенергії теж збільшується).

Проаналізувавши графіки споживання електроенергії при експлуатації різних електроприводів, можна зробити деякі попередні висновки. Так, очевидно, що електропривод ПН-АД споживає більше електроенергії у всіх режимах порівняно з реостатним регулюванням. Пояснюється це головним чином тим, що при роботі зі значними моментами (точки 1 і 2 на рис. 1) напруга дещо знижується, але струм ротора збільшується, це і приводить до більших змінних втрат у двигуні. Крім того, для електропривода ПН-АД враховуються втрати в перетворювачі, а при реостатному регулюванні збільшення втрат через це не відбувається. Далі, будь-який електропривод ПЧ-АД, що використовує двигун з фазним ротором, характеризується більшим споживанням електроенергії, ніж електропривод з короткозамкненим двигуном.

Так, при роботі на зниженій швидкості 20 % часу циклу ця різниця для перетворювача частоти з рекуперацією становить від 40–60 % (для циклу з 8 режимів) до 300–400 % для циклу з 5 режимів. Це пояснюється більшим номінальним струмом двигунів з фазним

ротором, а тому і більшими втратами. Порівняння цих графіків для двигунів трьох потужностей (табл. 3, 6) свідчить про тенденцію: зі збільшенням потужності електропривода має місце відносно менша економія електроенергії при переході до більш складних електроприводів. Це підтверджується також графіками рис. 2, 3 які показують, що збільшення потужності двигуна супроводжуються і збільшенням відносного часу роботи зі зниженою швидкістю, при якому втрати для деяких електроприводів (зокрема, ПЧ-АД з короткозамкненим ротором без рекуперації) стають меншими, ніж для реостатного регулювання.

Спостерігається тенденція того, що збільшення відносного часу роботи на зниженій швидкості дає більшу економію електроенергії при використанні частотного електропривода, особливо при можливості її рекуперації. Проте при малому відносному часі роботи зі зниженими швидкостями впровадження електропривода ПЧ-АД без функції рекуперації може привести до збільшення витрат електроенергії в порівнянні з найпростішим реостатним електроприводом. Особливо це проявляється у двигунів більшої потужності. Останнє пояснюється тим, що при використанні цього простого електропривода відсутні втрати в перетворювачі ($\eta_{\text{п}}=1$) і, головне, можлива рекуперація енергії в мережу, коли робота здійснюється на природній характеристиці у другому (четвертому) квадранті.

Попередні розрахунки свідчать про те, що термін окупності суттєво залежить від фірми-виробника перетворювачів, він може відрізнятись на 30–40 %. Так, з проведених досліджень видно, що перетворювачі без рекуперації енергії фірми SCHNEIDER ELECTRIC мають менші терміни окупності, а при необхідності рекуперації більш доцільно використовувати перетворювачі фірми SIEMENS [21].

Взагалі, для механізмів підйому перевантажувальних кранів термін окупності, як правило, збільшується з ростом потужності електропривода [20–21]. Цікаво, що для малого відносного часу роботи з низькими швидкостями (<10–15 %) недоцільно встановлювати перетворювачі без рекуперації. Тому особливо бажано використовувати ПЧ-АД для підйомних механізмів таких кранів, які значну частину всього часу роботи експлуатуються зі зниженими швидкостями (контейнерні крани, будівельні тощо).

7. Висновки

Встановлено, що споживання електроенергії асинхронними двигунами кранових механізмів залежить не тільки від типу електропривода, а також від особливостей технологічного процесу і режимів їх роботи. Показано, що при незначному часі роботи зі зниженими швидкостями електропривод ПЧ-АД без рекуператора споживає більше електроенергії, ніж електропривод з реостатним регулюванням.

Для вибору оптимального типу електроприводу була створена САД-система порівняння техніко-економічної ефективності асинхронних електроприводів кранових механізмів, яка дозволяє оперативно робити висновок про доцільність застосування оптимального електропривода в конкретних умовах експлуатації кранового механізму. Завдяки уніфікації підходів до аналізу режимів роботи механізмів підйому і повороту програма проводить розрахунок витрат електроенергії в статичному і в динамічному режимах. Програма обчислює можливу економію електроенергії та термін окупності електропривода ПЧ-АД з урахуванням навантаження, моментів інерції та відносного часу роботи зі зниженими швидкостями.

Література

1. Javied, T. A Study on Electric Energy Consumption of Manufacturing Companies in the German Industry with the Focus on Electric Drives Original Research Article [Text] / T. Javied, T. Rackow, R. Stankalla, C. Sterk, J. Franke // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 41. – P. 318–322. doi: 10.1016/j.procir.2015.10.006
2. Raubar, E. Anti-Sway System for Ship-to-Shore Cranes [Text] / E. Raubar, D. Vrancic // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2012. – Vol. 58, Issue 5. – P. 338–344. doi: 10.5545/sv-jme.2010.127
3. Miller, P. A techno-economic analysis of cost savings for retrofitting industrial aerial coolers with variable frequency drives [Text] / P. Miller, B. Olateju, A. Kumar // *Energy Conversion and Management*. – 2012. – Vol. 54, Issue 1. – P. 81–89. doi: 10.1016/j.enconman.2011.09.018
4. Usynin, Yu. S. Asynchronous electric drive with pulse-vector control [Text] / Yu. S. Usynin, A. V. Valov, T. A. Kozina // *Russian Electrical Engineering*. – 2011. – Vol. 82, Issue 3. – P. 134–137. doi: 10.3103/s1068371211030102
5. Emelyanov, A. P. Algorithms for management, modeling, and analysis of highly dynamical asynchronous electric drives control [Text] / A. P. Emelyanov, A. E. Kozyaruk // *Russian Electrical Engineering*, – 2011. – Vol. 82, Issue 2. – P. 61–68. doi: 10.3103/s1068371211020052
6. Tunyasirirut, S. Speed and Power Control of a Slip Energy Recovery Drive Using Voltage-source PWM Converter with Current Controlled Technique [Text] / S. Tunyasirirut, V. Kinnares // *Energy Procedia*. – 2013. – Vol. 34. – P. 326–340. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.761
7. Nicolae, P. About the experimental results of an electric driving system based on asynchronous motor and PWM converter [Text] / P. Nicolae, D. Stanescu, I. Sirbu // *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2008*. – P. 1181–1186. doi: 10.1109/epemc.2008.4635428
8. Zilkova, J. Fuzzy vector control of asynchronous motor [Text] / J. Zilkova, J. Timko, M. Kovac // *Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)*. – 2010. – Vol. 55, Issue 3. – P. 259–274. doi: 10.1109/epemc.2008.4635428

9. Blanusa, B. New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives [Text] / B. Blanusa. – New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems, 2010. doi: 10.5772/10427
10. Григоров, О. В. Енергозбереження шляхом застосування раціонального керування асинхронних електроприводів ВПМ [Текст] / О. В. Григоров, В. П. Свиргун, В. В. Стрижак, Ю. І. Зайцев // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Технології в машинобудуванні. – 2010. – Вып. 49. – С. 61–64.
11. Grygorov, O. V. Realization of energy-saving control modes on cranes of great load-carrying capacity [Text] / O. V. Grygorov, Y. I. Zaytsev, V. P. Svirgun, V. V. Stryzhak // Annals of the University of Petro ani : Mechanical Engineering – 2010. – Vol. 12. – P. 111–118.
12. Залізецький, А. М. Дослідження частотного електропривода в статичних режимах роботи [Текст] / А. М. Залізецький, О. В. Пізнюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 3. – С. 69–74.
13. Фираго, Б. И. Применение устройств плавного пуска и торможения асинхронных электрических двигателей с к.з. ротором в электроприводах крановых механизмов передвижения [Текст] / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – № 4 (80). – С. 30–38.
14. Радимов, С. Н. Потенциал энергосбережения электроприводов портовых грузоподъемных машин [Текст] / С. Н. Радимов, К. А. Аниченко // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – Вип. 66. – С. 322–323.
15. Мощинский, Ю. А. Обобщенная математическая модель частотно-регулируемого асинхронного двигателя с учетом потерь в стали [Текст] / Ю. А. Мощинский, Аунг Вин Тут // Электротехника. – 2007. – № 11. – С. 61–66.
16. Браславский, И. Я. Реалізація енергоощадних технологій на основі регульованих асинхронних електроприводов [Текст] / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов // Електроінформ. – 2003. – № 3. – С. 11–15.
17. Григоров, О. В. Аналіз пуско-гальмівних процесів кранових механізмів з частотно-регульованим приводом [Текст] / О. В. Григоров, В. В. Стрижак // Вестник ХНАДУ. – 2012. – Вып. 57. – С. 249–256.
18. Савич, С. П. Порівняння економічної ефективності альтернативних електроприводів у нестационарних режимах [Текст] / С. П. Савич // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – № 07 (83). – С. 50–55.
19. Герасимьяк, Р. П. Економічна ефективність використання перетворювачів частоти для кранових механізмів підйому [Текст] / Р. П. Герасимьяк, С. П. Савич, Л. А. Швець // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 03 (79). – С. 392–393.
20. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод [Текст] / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: АСАДЕМА, 2004. – 202 с.
21. SINAMICS G110, SINAMICS G120. Стандартные преобразователи. SINAMICS G 110 D, SINAMICS G 120 D [Текст]. – Децентрализованные преобразователи. Каталог D 11.1.2009.
22. Altivar 71 [Текст]. – Преобразователи частоты. Schneider Electric, 2009. – 332 с.