

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ СТАЦІОНАРНИХ УСТАНОВОК ПРОМИСЛОВИХ ВЕНТИЛЯТОРІВ

**СИНЕЦЬКИЙ А.В.** аспірант кафедри електричних машин Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: xibi-tur@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1859-4171>;

**КОЦУР І.М.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6394-7849>.

**Мета роботи.** Провести дослідження електромагнітних процесів в колі фазного ротора високовольтного асинхронного двигуна, під'єданого через перетворювач підвищуючого типу до мережі, визначити параметри перетворювача та їх взаємозв'язок з коефіцієнтом посилення за напругою для забезпечення оптимального рівня енергоефективності електромеханічної системи.

**Методи дослідження.** Методи теоретичної електротехніки для побудови схеми заміщення роторного кола асинхронного двигуна з перетворювачем підвищуючого типу, методи рішення системи диференціальних рівнянь першого порядку, аналітичні методи.

**Отримані результати.** Доведена доцільність щодо застосування перетворювача, який виконує поєднання роторного кола високовольтного асинхронного двигуна з мережею електропостачання, та забезпечує регулювання ЕРС ротора з рекуперацією енергії ковзання ротора асинхронного двигуна до мережі електропостачання. Це забезпечить регулювання швидкістю потужних високовольтних асинхронних двигунів на стороні ротора з ЕРС до 600В, та значно зменшить собівартість високовольтної електромеханічної системи. Запропонована методика щодо визначення коефіцієнту посилення перетворювача та параметрів роторного кола електромеханічної системи, яка дозволяє визначити коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора при оптимальному значенні коефіцієнту посилення за напругою. Визначені умови безаварійного режиму роботи інвертора в момент пуску електромеханічної системи. Досягнення цих умов забезпечується визначенням затримки керуючого сигналу на силові ключі інвертора перетворювача підвищуючого типу. Встановлено співвідношення коефіцієнту посилення за напругою з еквівалентним опором роторного кола електромеханічної системи.

**Наукова новизна.** Встановлено співвідношення коефіцієнту посилення за напругою з еквівалентним опором роторного кола електромеханічної системи, що дозволить забезпечити узгодження ЕРС ротора з напругою мережі електропостачання при збереженні високого рівня енергоефективності.

**Практична цінність.** Запропонована методика щодо визначення коефіцієнту посилення та параметрів перетворювача підвищуючого типу, яка дозволяє визначити коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора при оптимальному значенні коефіцієнту посилення за напругою. Запропонована методика може бути застосована при моделюванні складних потужних високовольтних електромеханічних систем особливо для стаціонарних установок промислових вентиляторів.

**Ключові слова:** перетворювач; параметри роторного кола, електромеханічна система; енергоефективність, висока напруга.

### I. ВСТУП

Застосування автоматизованої регульованої електромеханічної системи розглядається як найбільш актуальний та ефективний засіб енергозбереження [1]. Основні втрати (до 90%) припадають на сферу енергоспоживання, і саме тут мають бути сконцентровані основні зусилля щодо раціонального використання електроенергії [2], [3]. Так електромеханічні системи у всіх розвинених країнах споживають до 70% всієї електроенергії, що виробляється. Найбільш істотна її економія може бути досягнута при використанні регульованих електромеханічних систем у поєднанні з

автоматизацією технологічних процесів [4]. Наприклад, одним з найбільш енергоємних електромеханічних систем є вентилятори головного провітрювання вугільних шахт. Середня встановлена потужність електромеханічних систем для вентиляторів становить (1000 - 1600) кВт, а найбільш потужних установок - до 4000 кВт. Як приводний двигун в таких системах використовуються асинхронні двигуни з фазним ротором (АДФР) [5]. Тому на сьогоднішній день особливої інтерес представляють електромеханічні системи з АДФР, які мають широке застосування також і в підійомно-транспортних механізмах, в конвеєрних системах. Використання плавного регулювання в су-

часних електромеханічних системах істотно знижує споживання електроенергії і механічних навантажень, знос елементів механізмів, що істотно підвищує надійність систем.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Існує ряд технічних рішень, які дозволяють формувати характеристики з постійним моментом приводів на базі АДФР та забезпечувати плавність пуску з постійним прискоренням. До таких найбільш поширених систем відносяться класичні системи асинхронно - вентильного каскаду (АВК) [6], індуктивно-емісійні перетворювачі (ІЕП) [7], а також системи імпульсного регулювання струму ротора АДФР [8]-[10]. Недоліки таких систем відомі всім. До основних недоліків для ІЕП можна віднести відсутність можливості змінити величину струму, отже, і моменту приводного АДФР. Системи АВК мають низький коефіцієнт потужності, а також збільшену індуктивність узгоджувального реактора. Система імпульсного регулювання має низький коефіцієнт корисної дії, а також призводить до перенапруги обмотки ротора в процесі комутації ключа в колі випрямленого струму ротора АДФР.

У [8]-[9] запропонована система імпульсного частотно-струмового регулювання асинхронно-вентильного каскаду, яка поєднує в собі позитивні регульовальні характеристики імпульсного регулювання з можливістю рекуперації енергії в мережу. У порівнянні з ІЕП, перетворювач дозволяє незалежно підтримувати постійний струм в роторі від змінюваних параметрів АДФР в підсинхронному діапазоні обертання ротора [11]. Дана система регулювання добре зарекомендувала себе в електроприводах підйомно-транспортних механізмах і може бути також ефективно використана для потужних високовольтних електромеханічних систем вентиляторних установок, де застосування високовольтних перетворювачів частоти призводить до істотного збільшення їх вартості. Наявність джерела струму (моменту) в роторі перетворювача для керування вентиляторними навантаженнями дає можливість при заданому натиску повітря автоматично вибирати робочу точку витратно-напірної характеристики об'єкта провітрювання або гідропостачання при змінній величині витрати. Перетворювач дозволяє підвищити енергоефективність електромеханічних систем установок і механізмів різних галузей промисловості [11].

Відомо, що збільшення вихідної напруги в перетворювачі при зміні коефіцієнта заповнення обмежена втратами в самому перетворювачі. Крім цього, збільшення вихідної напруги можливе тільки при зниженні струму навантаження. При цьому, зростає коефіцієнт корисної дії перетворювача. У зв'язку з цим не вирішена задача в частині визначення оптимального значення коефіцієнта посилення перетворювача, що забезпечує високий коефіцієнт корисної дії, а також встановлення зв'язку його значення з встановленою

потужності елементів схеми перетворювача. Крім того визначення коефіцієнта посилення, а також параметрів схеми заміщення перетворювача дозволить розробити коло-польову модель електромеханічної системи з застосуванням високовольтного АД з фазним ротором для подальшого дослідження електромагнітних та механічних процесів в процесі регулювання аеродинамічними параметрами промислових вентиляторів.

## III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є дослідження електромагнітних процесів в колі фазного ротора високовольтного асинхронного двигуна, під'єданого через перетворювач підвищуючого типу до мережі, визначити параметри перетворювача та їх взаємозв'язок з коефіцієнтом посилення за напругою для забезпечення оптимального рівня енергоефективності електромеханічної системи.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

На рис. 1 наведена електромеханічна система АД з фазним ротором та імпульсним перетворювачем підвищуючого типу з інвертором відомим мережею в колі ротора. Наявність конденсатора (С) забезпечує виключення перенапруги в обмотці ротора, викликаного частою комутацією ключа (К). Діод (VD) запобігає появі зворотного струму з конденсатора при замиканні ключа. При розмиканні ключа енергія в обмотці ротора, а також частина енергії ковзання, залежно від співвідношення Е.Р.С. ротора та Е.Р.С. інвертора (I), рекуперується в мережу при постійному куті інвертування малопотужного інвертора, що забезпечує мінімальне споживання реактивної енергії з мережі і дозволить підвищити коефіцієнт потужності електромеханічної системи у всьому діапазоні частоти обертання ротора.

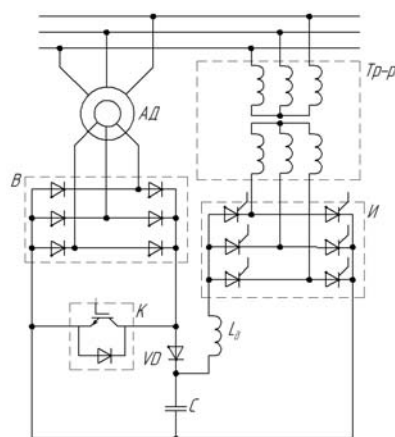
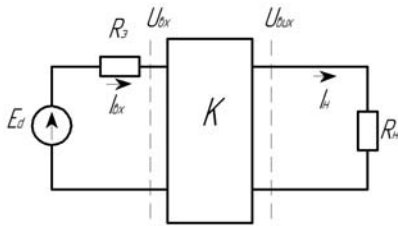


Рисунок 1. Електромеханічна система асинхронного двигуна з перетворювачем підвищуючого типу та інвертором відомим мережею в колі ротора

Узгодження Е.Р.С. ротора та Е.Р.С. інвертора

може виконуватись за допомогою трансформатора чи автотрансформатора. Коефіцієнт трансформації визначається вихідною напругою інвертора відомого мережу.

Спрощена схема роторного кола електромеханічної системи наведено на рис. 2. Тут навантаження представлена у вигляді активного опору  $R_n$ , яке для досліджуваного перетворювача характеризує кількість енергії, що рекуперується в мережу.



**Рисунок 2.** Спрощена схема роторного кола електромеханічної системи

Як відомо з [10], коефіцієнт передачі ідеального перетворювача підвищуючого типу описується співвідношенням [13]:

$$K = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{I}{I - \gamma}, \quad (1)$$

$$K = \frac{I_{вх}}{I_{вих}}, \quad (2)$$

де  $I_{вих}$ ,  $U_{вих}$  - відповідно середнє значення вихідного струму та напруги перетворювача;  $I_{вх}$ ,  $U_{вх}$  - відповідно середнє значення вхідного струму та напруги перетворювача;  $\gamma = t_i/T$  - коефіцієнт заповнення, рівний відношенню тривалості включеного стану силового ключа  $t_i$  до періоду повторюваності  $T$ .

З (1) бачимо, що при  $\gamma \rightarrow I$ , коефіцієнт передачі  $K \rightarrow \infty$ , відповідно, і вихідна напруга зростає до нескінченності, що призводить до порушення закону збереження енергії. На практиці, збільшення вихідної напруги при зміні коефіцієнта заповнення обмежені втратами як в джерелі живлення, так і в самому імпульсному перетворювачі.

В основу цієї моделі покладено уявлення про імпульсний перетворювач як про "чорний ящик" без втрат, властивості якого описуються наступною системою рівнянь [13]:

$$U_{вих} = K \cdot U_{вх}, \quad (3)$$

$$I_{вх} = K \cdot I_n, \quad (4)$$

де  $U_{вх}$ ,  $U_{вих}$  - середнє значення вхідного та вихідного напруження, відповідно;  $K$  - коефіцієнт перетво-

рення;  $I_{вх}$  - середнє значення вхідного струму;  $I_n$  - середнє значення струму навантаження.

Рівність коефіцієнтів передачі за струмом та за напругою в рівняннях (3) і (4) для ідеального перетворювача підвищуючої напруги можна довести, виходячи з умови рівності потужності на вході і на виході. Наявність втрат у системі враховується за допомогою еквівалентного опору втрат [13]:

$$R_e = R_2 + R_{nm}, \quad (5)$$

де  $R_2$  - внутрішній опір джерела живлення;  $R_{nm}$  - еквівалентний опір втрат перетворювача.

Таким чином, потужність втрат у системі, згідно такої моделі, пропорційна другому ступеню вхідного струму [13]:

$$P_n = I_{вх}^2 \cdot R_e, \quad (6)$$

Із еквівалентної схеми, наведеної на рис. 2 виходить, що:

$$U_{вх} = E_d - I_{вх} \cdot R_e. \quad (7)$$

Тоді, використовуючи (3), (4) та (7) рівняння можна переписати в наступному вигляді:

$$U_{вих} = K \cdot E_d - K^2 \cdot I_n \cdot R_e. \quad (8)$$

Рівняння (8) є рівнянням зовнішньої характеристики перетворювача при постійному  $K$  і, відповідно, рівнянням регульовальної характеристики при постійному струмі  $I_n$ . Досліджуючи (8) на максимум, можна показати, що існує "оптимальне" (за величиною вихідної напруги) значення коефіцієнта перетворення:

$$K_0 = \frac{E_d}{2R_e \cdot I_n}. \quad (9)$$

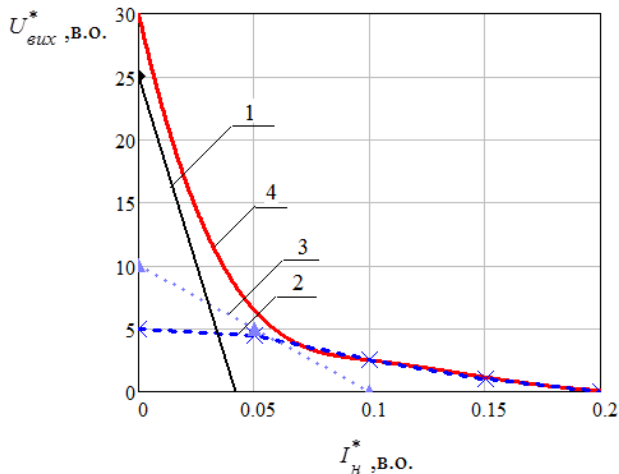
Якщо вибрати в якості базисних величин  $U_0 = E_d$  і  $I_0 = E_d/R_e$ , то рівняння (8) можна представити у відносних одиницях:

$$U_{вих}^* = K - K^2 \cdot I_n^*. \quad (10)$$

На рис. 3 показано сімейство зовнішніх характеристик, побудоване за (10). Як видно з рис. 3, всі зовнішні характеристики є дотичними до гіперболи граничної потужності системи  $P_{max}$ .

З [13], величина граничної потужності дорівнює:

$$P_{max} = \frac{1}{4} U_0 I_0 = \frac{E_d^2}{4R_e}. \quad (11)$$

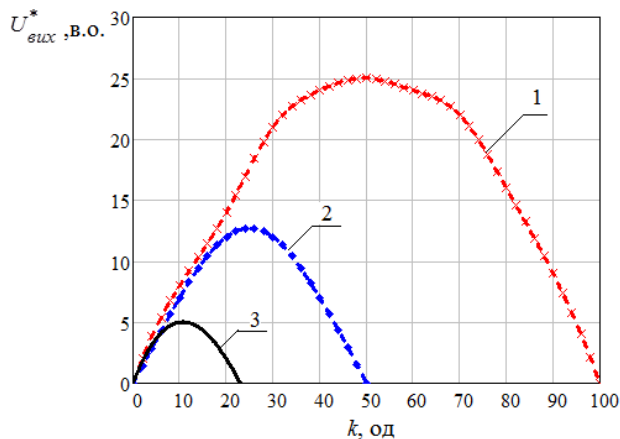


1) граничне значення потужності ( $P_n$ ); 2 – при  $k=5$ ; 3 – при  $k=10$ ; 4 – при  $k=25$ ;

**Рисунок 3.** Сімейство зовнішніх характеристик перетворювача: 1) граничне значення потужності ( $P_n$ ); 2 – при  $k=5$ ; 3 – при  $k=10$ ; 4 – при  $k=25$ ;

Слід зазначити, що при струмі навантаження, що відповідає точки дотику зовнішньої характеристики до гіперболи граничної потужності (див. рис. 3), коефіцієнт корисної дії (К.К.Д.) дорівнює 0,5. Відповідно, при менших струмах К.К.Д зростає, а при великих падає. Крім того, в перетворювачі підвищуючого типу коефіцієнт перетворення  $K$  не може бути менше одиниці.

На рис. 4 наведені регулювальні характеристики перетворювача. Як видно з представлених кривих, істотні підйоми вихідної напруги можливі лише при малих величинах відносних струмів навантаження.



1 – для  $I^*_n = 0,01$ ; 2 – для  $I^*_n = 0,02$ ; 3 – для  $I^*_n = 0,05$

**Рисунок 4.** Сімейство регулюючих характеристик перетворювача

Так як, при зміні Е.Р.С. ротора АД, енергія, яка віддається в мережу, залежить від ковзання ротора, а тому вираз (8) доцільно записати у вигляді:

$$U_n = K \cdot E_{d0} \cdot s - K^2 \cdot \frac{P_n \cdot s}{U_{вих}} \cdot R_e, \quad (12)$$

$$I_n = \frac{P_n \cdot s}{U_{вих}}, \quad (13)$$

де  $P_n$  - номінальна потужність на валу ротора;  $s$  - ковзання.

Для зручності розрахунків введемо базові величини:

$$U_{\delta} = E_{d0}, \quad (14)$$

$$I_{\delta} = \frac{P_n}{U_{\delta}} = \frac{P_n}{E_{d0}}, \quad (15)$$

$$R_n = \frac{E_{d0}^2}{P_n}. \quad (16)$$

Тоді рівняння (12) у відносних одиницях має вигляд:

$$U_n^* = K \cdot s - K^2 \cdot R_e^* \cdot I_n^*, \quad (17)$$

де

$$R_e^* = \frac{R_e}{R_n}. \quad (18)$$

Максимальний коефіцієнт підсилення перетворювача дорівнює:

$$K_{max} = \frac{1}{2 \cdot R_e^*}. \quad (19)$$

Таким чином максимальний коефіцієнт підсилення не залежить від ковзання. При заданій напрузі холостого ходу джерела, еквівалентний опір втрат  $R_e$  накладає принципове обмеження на досяжний рівень вихідної напруги інвертора підвищуючого типу. Величина максимальної вихідної напруги швидко зменшується зі збільшенням необхідного струму навантаження. Прагнення "видавити" максимально можливу вихідну напругу призводить до зменшення К.К.Д, який на рівні максимальної потужності дорівнює лише 50%, а реальний коефіцієнт перетворення становить лише половину коефіцієнта перетворення "ідеального перетворювача", що визначається за (1).

Таким чином, при ідентифікації оптимальних параметрів, а також частоти комутації і коефіцієнта заповнення імпульсів силового ключа К (рис. 1), необхідно визначити оптимальне значення еквівалентного опору  $R_e$ .

На рис. 5 представлена схема заміщення кола випрямленого струму ротора. Для даної схеми заміщення визначимо параметри перетворювача:

$$R_2 = r_{\text{dp}} + 2 \cdot r_T + \frac{3 \cdot x_T \cdot s}{\pi}, \quad (20)$$

$$R_1 = 2 \cdot (r_s + r_m) \cdot s + 2 \cdot r_r + \frac{3 \cdot x_{\text{d}} \cdot s}{\pi}, \quad (21)$$

$$L_1 = 2 \cdot L_{\text{d}}, \quad (22)$$

$$L_2 = L_{\text{dp}} + 2 \cdot L_T, \quad (23)$$

де  $r_{\text{dp}}$  - активний опір дроселя інвертора;  $L_{\text{d}}$  - індуктивність розсіювання фази АД;  $L_{\text{dp}}$  - індуктивність дроселя інвертора;  $r_r$  - активний опір фази ротора двигуна;  $r_s$  - активний опір фази статора, приведений до обмотування ротора;  $r_m$  - опір магнітного контуру АД;  $r_T$  - активний еквівалентний опір фази трансформатора;  $\frac{3 \cdot x_{\text{d}} \cdot s}{\pi}$  - еквівалентний опір, викликане комутацією вентилів випрямляча;  $\frac{3 \cdot x_{2T} \cdot s}{\pi}$  - еквівалентний опір, викликане комутацією вентилів інвертора;  $x_T$  - еквівалентний індуктивний опір фази трансформатора.

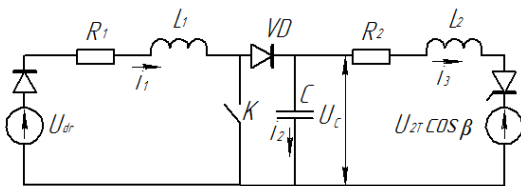


Рисунок 5. Схема заміщення кола випрямленого струму ротора АД

Індуктивний опір розсіювання фази АД:

$$x_{\text{d}} = x_s + x_r = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_s + L_r), \quad (24)$$

де  $L_s$  - повна індуктивність фази статора, приведена до ротора АД;  $L_r$  - повна індуктивність фази ротора.

Відповідно до особливості комутації силового ключа (К) необхідно виділити основні етапи роботи схеми, кожному з яких буде відповідати певне рівняння перехідних процесів.

На рис. 6 представлені основні етапи роботи перетворювача. Перший (початковий) етап роботи перетворювача характеризується зарядом конденсатора (С) до значення напруги  $U_c = U_{2T} \cdot \cos \beta$  при розімкненому ключі (К) в період часу рівний  $t = t_1 - t_0$  (див. рис. 1). Цьому моменту часу буде відповідати контур заряду конденсатора  $C \rightarrow R_2 \rightarrow L_2 \rightarrow C$ . Щоб уникнути перекидання інвертора відомого мережею,

на його ключі будуть подаватися керуючі сигнали в момент його запуску. У цей час процес рекуперації енергії ковзання ротора неможливий (виконується умова  $U_c < U_{2T} \cdot \cos \beta$ ).

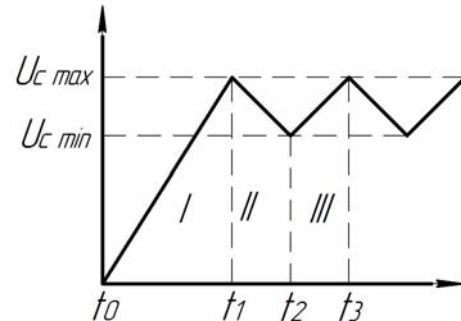


Рисунок 6. Етапи роботи перетворювача

Відповідно до рис.3 струм заряду конденсатора та напруга на першому етапі роботи схеми змінюватиметься за періодичним законом:

$$u_c(t) = U_{2T(0)} \cos \beta \cdot e^{-\delta \cdot t} \sin(\omega_0 t), \quad (25)$$

$$i_2(t) = C \cdot \frac{d}{dt} u_c(t), \quad (26)$$

де

$$\delta = \frac{R_2}{2 \cdot L_2}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot L_2 \cdot C} - \left(\frac{R_2}{2 \cdot L_2}\right)^2}.$$

Для того, щоб перетворювач увійшов до другого етапу роботи необхідно визначити час затримки включення інвертора, після закінчення якого буде виконуватися умова рекуперації  $U_c \geq U_{2T} \cdot \cos \beta$ .

Мінімальне значення часу затримки включення інвертора визначається часом заряду конденсатора. Так як в процесі заряду конденсатора струм заряду знижується, то для знаходження часу заряду конденсатора рівняння (25),(26) необхідно прирівняти до нуля. Отже, мінімальне значення часу затримки включення інвертора визначається згідно з наступним виразом:

$$t_1 = \frac{2 \cdot \arctg \left( \frac{\delta + \sqrt{\omega_0^2 + \delta^2}}{\omega_0} \right)}{\omega_0} - \frac{2 \cdot \arctg \left( \frac{\delta - \sqrt{\omega_0^2 + \delta^2}}{\omega_0} \right)}{\omega_0}, \quad (27)$$

На другому етапі перетворювач входить до основного режиму роботи. Другий етап роботи перетворювача характеризується розрядом конденсатора (С) при замкнутому ключі (К) у період часу  $t = t_2 - t_1$ . Енергія, що була накопичена на конденсаторі, рекуперується через інвертор до мережі. Цьому моменту часу відповідатимуть контури  $R_1 \rightarrow L_1 \rightarrow K \rightarrow R_1$  та  $C \rightarrow R_2 \rightarrow L_2 \rightarrow C$  (див. рис.5).

Система диференціальних рівнянь для даного стану схеми має вигляд:

$$R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} = 1,35 \cdot U_{dr} \cdot s, \quad (28)$$

$$U_{c(t=t_1)} - U_{2T} \cdot \cos(\beta) = R_2 \cdot i_3 + L_2 \cdot \frac{di_3}{dt}. \quad (29)$$

Розглянемо третій етап роботи перетворювача в момент часу рівний  $t = t_3 - t_2$ , при якому силовий ключ (К) розімкнено. У даному випадку частина енергії ковзання, а саме накопичена енергія в обмотці ротора, яка обумовлена різкою зміною випрямленого струму ротора, акумулюється на конденсаторі (контур  $R_1 \rightarrow L_1 \rightarrow C \rightarrow R_1$ ), а решта її частина рекуперується до мережі електропостачання через дросель та інвертор (контур  $R_1 \rightarrow L_1 \rightarrow VD \rightarrow R_2 \rightarrow L_2 \rightarrow R_1$ ).

Диференціальні рівняння для цього стану схеми мають вигляд:

$$R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2 dt = 1,35 \cdot U_{dr} \cdot s, \quad (30)$$

$$R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_3}{dt} + R_2 \cdot i_3 = 1,35 \cdot U_{dr} \cdot s + U_{2T} \cdot \cos \beta, \quad (31)$$

$$i_1 = i_2 + i_3, \quad (32)$$

Диференціальні рівняння (28)-(32), можуть бути зведені до системи лінійних рівнянь алгебри. Внаслідок цього можна визначити основні параметри перетворювача.

Активний опір дроселя інвертора можна визначити з наступного виразу:

$$r_{dp} = \frac{\gamma \cdot (U_{2T} \cos \beta - E_d) - I_{d\_cp} \cdot R_1}{I_d} - 2 \cdot r_l - \frac{3 \cdot x_T \cdot s}{\pi} \quad (33)$$

де

$$I_{d\_cp} = \frac{\gamma \cdot (U_{2T} \cos \beta - E_d)}{R_1 + R_2}, \quad (34)$$

$$E_d = 1,35 \cdot U_{dr} \cdot s. \quad (35)$$

де  $I_{d\_cp}$  - середнє значення випрямленого струму ротора АД;  $\gamma$  - коефіцієнт заповнення імпульсу при широтно-імпульсному регулюванні.

Індуктивність дроселя інвертора можна визначити з наступного виразу:

$$L_{dp} = \frac{T \cdot \gamma \cdot U_{2T} \cos \beta \cdot (1 - \gamma) - \Delta I_d \cdot L_1}{\Delta I_d} - 2 \cdot L_T, \quad (36)$$

$$\Delta I_d = \frac{\gamma \cdot U_{2T} \cos \beta \cdot (1 - \gamma)}{f_k \cdot (L_1 + L_2)}, \quad (37)$$

де  $\Delta I_d$  - величина розмаху пульсації випрямленого струму ротора;  $f_k$  - частота комутації силового ключа;

Величина ємності конденсатора повинна бути обрана таким чином, щоб забезпечити скидання енергії, яка накопичена в обмотці ротора на конденсатор:

$$\frac{L_1 \cdot (I_{dmax} - I_{dmin})^2}{2} \cdot f_k \leq \frac{(U_{cmax} - U_{cmin})^2}{2} \cdot C \quad (38)$$

де

$$I_{dmin} = I_{dcp} - \frac{\Delta I_d}{2}, \quad (39)$$

$$I_{dmax} = I_{dcp} + \frac{\Delta I_d}{2}. \quad (40)$$

$$U_{cmin} = U_{2T(0)} \cos \beta - \frac{U_{2T} \cos \beta \cdot \Delta U_c^*}{2}, \quad (41)$$

$$U_{cmax} = U_{2T(0)} \cos \beta + \frac{U_{2T} \cos \beta \cdot \Delta U_c^*}{2}. \quad (42)$$

Величина пульсації напруги на конденсаторі у в.о. може бути визначена з наступного виразу:

$$\Delta U_c^* = 1 - \frac{u_{2T} \cos \beta}{u_c} \quad (43)$$

Величину ємності конденсатора, згідно (38) можна визначити з наступного виразу:

$$C \geq \frac{L_1 \cdot (I_{dmax} - I_{dmin})^2 \cdot f_k}{(U_{cmax} - U_{cmin})^2} \quad (44)$$

Таким чином еквівалентний опір роторного кола АД можна визначити з наступного виразу:

$$R_e = 2(R_s + R_m)s + 2 \cdot R_r + 2\pi f(L_1 + L_2) +$$

$$+ R_{op} + R_T + \frac{3 \cdot x_\delta \cdot s}{\pi} + \frac{3 \cdot x_T \cdot s}{\pi} \quad (45)$$

Всі змінні, які містяться у виразах (27), (33) - (45) є або вхідними параметрами перетворювача, або паспортними даними елементів електромеханічної системи. Отримані вирази дозволяють визначити оптимальні параметри роторного кола електромеханічної системи, визначити необхідний коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора, а також оптимальне значення коефіцієнта посилення перетворювача при забезпеченні найвищого рівня енергоефективності.

## V. ВИСНОВКИ

Запропонована методика щодо визначення коефіцієнту посилення перетворювача та параметрів роторного кола електромеханічної системи, яка дозволяє визначити коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора при оптимальному значенні коефіцієнту посилення за напругою. Запропонована методика може бути застосована при моделюванні складних потужних високовольтних електромеханічних систем особливо для стаціонарних установок промислових вентиляторів.

Визначені умови безаварійного режиму роботи інвертора в момент пуску електромеханічної системи. Досягнення цих умов забезпечується визначенням затримки керуючого сигналу на силові ключі інвертора перетворювача підвищувального типу.

Встановлено співвідношення коефіцієнту посилення за напругою з еквівалентним опором роторного кола електромеханічної системи, що дозволить забезпечити узгодження ЕРС ротора з напругою мережі електропостачання при збереженні високого рівня енергоефективності електромеханічної системи.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kotsur, M. Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia // IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), February 20-24, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 304-307 DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336208.
- [2] Пивняк Г. Г. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією / Г.Г. Пивняк, О. В. Волков – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет – 2006. – 470 с.
- [3] Лозинський, А. О. Розв'язання задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB [Текст]: Навчальний посібник / А. О.

Лозинський, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – Л.: Магнолія, 2007. – 215 с.

- [4] Dubey, G.K. Power semiconductor controlled drives / G.K. Dubey; - London: PHI. Edition, 2008. – 440 p.
- [5] Антощенко Н. І. Новий підхід до регулювання вентиляції вугільних шахт / Н. І. Антощенко, В. В. Калюжний, В. П. Котіков, Г. Б. Тинда, П. Д. Андрієнко, О. В. Садовий // Вугіль України – 2014 - №3 - С. 29-32.
- [6] Онищенко Г.Б. Электрический привод [Текст] Г. Б. Онищенко. – М.: Издательский дом "Академия", 2006. – 288с.
- [7] Волков И. В. Системы стабилизированного тока для автоматизированных электроприводов [Текст] / И. В. Волков, В. П. Стяжкин, С. В. Подольный // Пр. ін-ту електродинаміки НАН України. – 2009. – Вип. 23. – С. 64-72.
- [8] Пат. України 64126, МПК H02P 27/05(2006.01) Пристрій імпульсного керування процесами перетворення енергії в асинхронному двигуні з фазним ротором [Електронний ресурс] / П.Д. Андрієнко, М.І. Коцур, І.М. Коцур; заявл. 22.04.11; опубл. 25.10.2011, Бюл. №20, 2011р. – Режим доступу: [http:// http://www.uipv.org](http://www.uipv.org).
- [9] Коцур М. І. Особливості режиму роботи модифікованої системи імпульсного регулювання асинхронного двигуна з фазним ротором / М. І. Коцур, П. Д. Андрієнко, І. М. Коцур, // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2012. – №3(19) – С. 163 – 165.
- [10] Коцур, М. І. Регульований асинхронний електропривод з покращеними характеристиками / М. І. Коцур, А. А. Андрієнко, Д. С. Андрієнко, О. В. Немикіна // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2016. – №22(98) – С. 74 – 78.
- [11] Коцур М. І. Підвищення ефективності режиму гальмування противмиканням асинхронного двигуна з фазним ротором [Текст] / М. І. Коцур, І. М. Коцур, А. В. Близняков // Східно-Європейський журнал передових технологій. –2015. – №1/8(73). – С.27-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36670>
- [12] Шавьолкін О.В. Силові напіпровідникові перетворювачі енергії: Навчальний посібник. – Харків: ХНУМ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 403с.
- [13] Переверзев, А.В. Характеристики підвищувальних перетворювачів для систем безперебійного електроживлення / О.В. Переверзев. – Київ: Технічна електродинаміка, 2004. – 239 с.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2024 р.

## DETERMINATION OF CONVERTER PARAMETERS FOR HIGH-VOLTAGE ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF STATIONARY INSTALLATIONS OF INDUSTRIAL FANS

- SYNETSKYI A.V. postgraduate student of the Department of Electrical Machines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: xibi-tur@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1859-4171>;
- KOTSUR I.M. Ph.D in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Machines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6394-7849>;

**Purpose.** To study the electromagnetic processes in the circuit of the phase rotor of a high-voltage induction motor connected to the network through a step-up converter, to determine the parameters of the converter and their relationship with the voltage gain to ensure the optimal level of energy efficiency of the electromechanical system.

**Methodology.** Methods of theoretical electrical engineering for the construction of a rotor circuit replacement scheme for an induction motor with a step-up converter, methods for solving a system of first-order differential equations, analytical methods.

**Findings.** The expediency of using a converter that combines the rotor circuit of a high-voltage induction motor with the power supply network and provides regulation of the rotor EMF with the recovery of the slip energy of the induction motor rotor to the power supply network has been proved. This will ensure speed control of powerful high-voltage induction motors on the rotor side with an EMF of up to 600 V and significantly reduce the cost of a high-voltage electromechanical system. A methodology for determining the converter gain and the parameters of the rotor circuit of the electromechanical system is proposed, which allows determining the transformation ratio of the matching transformer at the optimal value of the voltage gain. The conditions of trouble-free operation of the inverter at the moment of start-up of the electromechanical system are determined. Achieving these conditions is ensured by determining the delay of the control signal to the power keys of the inverter of a step-up converter. The correlation between the voltage gain and the equivalent resistance of the rotor circuit of the electromechanical system is established.

**Originality.** The ratio of the voltage gain to the equivalent resistance of the rotor circuit of the electromechanical system is established, which will ensure the matching of the rotor EMF with the voltage of the power supply network while maintaining a high level of energy efficiency.

**Practical value.** A methodology for determining the gain and parameters of a step-up converter is proposed, which allows determining the transformation ratio of a matching transformer at the optimal value of the voltage gain. The proposed methodology can be applied to the modelling of complex powerful high-voltage electromechanical systems, especially for stationary installations of industrial fans.

**Keywords:** converter; parameters of the rotor circuit, electromechanical system; energy efficiency, high voltage

### REFERENCES

- [1] Kotsur M., Yarymbash D., Kotsur I., Yu. Bezverkhnia. (2018). Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors. *IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, February 20-24, Lviv-Slavske, Ukraine, 304-307 DOI:10.1109/TCSET.2018.8336208.
- [2] Pivnyak, G.G. and Volkov A.V. (2006) *Sovremennye chastotno-reguliruemye asinkhronnye elektroprivody s shirotno-impul'snoi modulyaciyei* [Modern Frequency Controlled Asynchronous Electric Drives with Pulse-Width Modulation], Dnipropetrovsk: Natsionalnyi girnychiyi Universytet, Ukraine – 470 p.
- [3] Lozinskyi A. O., Moroz V. I., Paranchuk Ya. S. (2007). Solving problems of electromechanics in the environments of MathCAD and MATLAB packages. *Magnolia*, 215.
- [4] Dubey, G.K. (2008). Power semiconductor controlled drives. *PHI. Edition*, 440.
- [5] Antoshchenko N. I., Kalyuzhny V. V., Kotikov V. P., Tynda G. B., Andrienko P. D., Sadovoy A. V. (2014). New approach to regulation of ventilation of coal. *Coal of Ukraine*, 3, 29-32.
- [6] Onishchenko G.B. (2006) *Elektricheskiy privod* [Electric Drive], Moscow, Publishing House "Academia", 288 p.
- [7] Volkov I. V., Stiazhkin S.V., Podolnyi S. V. (2009). *Systemy stabilizirovannogo toka dlya avtomatizirovannykh elektroprivodov* [System of stabilized cur-



- rent for automated electric drives], *Trudih Institutu Elektrodinamiki NAN Ukrainih*, 23, 64-72.
- [8] Andrienko P.D., Kotsur M. I., Kotsur I.M. (2011) Patent of Ukraine 64126, Int. Cl.<sup>3</sup> H02P 27/05(2006.01) Prystryi impulsnogo keruvannya procesamy peretvorenniya energiyi v asinkhronnomu dvyguni z faznym rotorom. [Device for impulse control by energy conversion processes in wound-rotor induction motor] published 25.10.2011, Bulletin №20,
- [9] Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M. (2012). Osobennosti rezhimov raboty modifitsirovannoy sistemy impulsnogo regulirovaniya [Operation modes features of modificate pulse control system of asynchronous motor with phase rotor], *Elektromechanichni ta enegrozberigayuchi sistemy*, 19, 3, 163-165.
- [10] M. I. Kotsur, A. A. Andrienko, D. S. Andrienko, O. V. Nemykina (2016). Regulated asynchronous electric drive with improved characteristics, *Electrical engineering and computer systems*, 22(98), 74 – 78.
- [11] Kotsur M.I., Kotsur I.M., Bliznyakov A.V. (2015). Increase effectiveness of reversible braking mode realization of the wound-rotor induction motor, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Volume 1, Issue 8, pp. 27-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36670>.
- [12] Shaviolkin O.V. (2015). Power semiconductor energy converters, KhNUM University named after OHM. Beketova, 403.
- [13] Pereverzev, A.V. (2004). Characteristics of step-up converters for uninterruptible power supply systems, *Tekhnichna Elektrodinamika*, 239.