

УДК 621.313.333

АНАЛІЗ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ З ВИКОРИСТАННЯМ СПЕКТРАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ

Бурбело М. Й., д.т.н., проф.

Вінницький національний технічний університет

Гадай А.В., ас.

Луцький державний технічний університет

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

E-mail: burbelom@rambler.ru

Предложен новый подход к анализу асинхронных двигателей в переходных режимах, основанный на использовании спектральных параметров.

Ключевые слова: спектральные параметры, асинхронные двигатели.

The new approach to the analysis of induction motor in transitive modes based on use of spectral parameters is offered.

Key words: spectral parameters, induction motor.

Вступ. Під час пуску, а також в різкозмінних режимах роботи для асинхронних та синхронних електроприводів характерними є коливання активної та реактивної потужностей, що зумовлює виникнення додаткових втрат електричної енергії та напруги в мережах живлення.

Одним із ефективних заходів підвищення ефективності асинхронних двигунів (АД) є індивідуальна компенсація їх реактивної потужності. Водночас для вибору силових елементів пристроїв індивідуальної компенсації реактивної потужності в перехідних режимах необхідним є визначення їх оптимальних параметрів, що змінюються в часі. Задача вибору оптимальних параметрів в перехідних режимах АД ускладнюється через незавершеність теорії потужності в електричних колах в перехідних режимах. У зв'язку з цим відсутні еквівалентні пасивні параметри, які можна було б однозначно використовувати як проміжні розрахункові величини під час пуску АД, зокрема, при виборі пристроїв індивідуальної компенсації реактивної потужності АД [1, 2].

Аналіз попередніх досліджень. Для отримання виразів реактивної потужності в перехідних режимах можливими є три підходи [3]: 1) на основі декомпозиції на складові миттєвих напруг та струмів; 2) на основі декомпозиції на складові миттєвої потужності; 3) на основі перетворення Гільберта миттєвих напруг та струмів. Ефективним є третій підхід, який дозволяє отримати вирази для реактивної потужності в інтегральній формі:

$$Q = \frac{c}{T} \int_0^T u(t)H\{i(t)\}dt = -\frac{c}{T} \int_0^T i(t)H\{u(t)\}dt,$$

де c – стала інтегрувального перетворення; $H\{i(t)\}$, $H\{u(t)\}$ – перетворення Гільберта відповідно струму

та напруги.

В [4] для електричних кіл у разі дії несинусоїдного струму введені поняття активних та реактивних складових спектральних опор та провідності:

$$R_C = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt}{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t)dt};$$

$$X_C = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)H\{i(t)\}dt - \frac{1}{T} \int_0^T i(t)H\{u(t)\}dt}{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t)dt} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)H\{i(t)\}dt - \frac{1}{T} \int_0^T i(t)H\{u(t)\}dt}{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t)dt},$$

$$g_C = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t)dt};$$

$$b_C = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)H\{i(t)\}dt - \frac{1}{T} \int_0^T i(t)H\{u(t)\}dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t)dt} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)H\{i(t)\}dt - \frac{1}{T} \int_0^T i(t)H\{u(t)\}dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t)dt}.$$

З використанням спектральних пасивних параметрів зручно представити відомі способи розкладання миттєвого несинусоїдного струму на ортогональні складові. С. Фрізе запропонував використовувати дві ортогональні складові [5]:

$$i(t) = g_C u(t) + \sum_{n=1}^{\infty} i'_n(t),$$

а Л. Чарнецькі використовує три складові струму, що

відповідає розкладу на складові реактивної потужності за Будеану, у вигляді [6]:

$$i(t) = g_C u(t) + b_C N[-u(t)] + \sum_{n=1}^{\infty} i''_n(t),$$

де $i'_n(t)$, $i''_n(t)$ – залишкові гармоніки струму.

Ці розклади поширені на трифазні електричні кола. Так, Л. Чарнецькі для несиметричних трифазних навантажень використовує таке представлення миттєвих струмів фаз [7]:

$$\mathbf{i}(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \left[g_C \mathbf{U} e^{j\omega t} + j b_C \mathbf{U} e^{j\omega t} + \mathbf{Y}_{21} \mathbf{U}^{\#} e^{j\omega t} \right],$$

де $\mathbf{i}(t)$, \mathbf{U} , $\mathbf{U}^{\#}$ – вектори миттєвих струмів, комплексних напруг прямої та зворотної послідовностей; \mathbf{Y}_{21} – комплексна провідність зворотної послідовності несиметричного трифазного навантаження.

В симетричних та несиметричних режимах трифазних кіл існує єдина формула повної потужності, записана в координатах α , β , а реактивна потужність може бути подана у вигляді:

$$Q = \frac{3}{2} \frac{c}{T} \int_0^T (u_{\alpha}(t) N\{i_{\alpha}(t)\} + u_{\beta}(t) N\{i_{\beta}(t)\}) dt.$$

За умови дії синусоїдних струмів і напруг в [8] рекомендовано поняття коефіцієнта потужності, який визначають із співвідношення:

$$\lambda = \frac{P}{UI}.$$

З останнього виразу випливає, що коефіцієнт потужності λ можна виразити як корінь квадратний добутку активних спектральних опорів та провідності:

$$\lambda = \sqrt{R_C g_C}.$$

Реактивна спектральна провідність, що відповідає розкладу Фрізе, буде:

$$b_F = y \sqrt{1 - \lambda^2},$$

де y – повна провідність навантаження.

Вираз для реактивного спектрального опорів, що відповідає розкладу Фрізе, аналогічний

$$X_F = Z \sqrt{1 - \lambda^2},$$

де Z – повний опір навантаження.

Мета роботи – підвищення ефективності процесів електроспоживання АД під час їх пуску та в змінних режимах навантаження із застосуванням пристроїв регулювання реактивної потужності, принцип дії яких оснований на використанні спектральних пасивних параметрів.

Матеріал і результати дослідження. *Характеристики АД в перехідних режимах з використанням спектральних опорів.* Введемо спектральні провідності, для визначення яких будемо використовувати умови еквівалентності між складовими комплексних спектральних опорів і провідностей:

$$g_K = \frac{R_C}{R_C^2 + X_C^2}; \quad b_K = \frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2},$$

а також – спектральний коефіцієнт потужності

$$\lambda_C = \frac{R_C}{\sqrt{R_C^2 + X_C^2}} = \frac{g_C}{\sqrt{g_C^2 + b_C^2}} = \frac{g_K}{\sqrt{g_K^2 + b_K^2}}.$$

З метою подальшого аналізу енергетичних процесів під час перехідних процесів введемо поняття поточних значень активної та реактивної потужностей, квадрата напруги та квадрата струму:

$$P(t) = \int_{t-T/2}^t u i_c dt; \quad Q(t) = \int_{t-T/2}^t u i_k dt;$$

$$U^2(t) = \int_{t-T/2}^t u^2 dt; \quad I^2(t) = \int_{t-T/2}^t i^2 dt,$$

де u, i – миттєві напруга та струм; i_c, i_k – синфазна та квадратурна складові струму, а також поточних значень складових спектрального опорів та провідностей:

$$R_C(t) = \frac{P(t)}{I^2(t)}; \quad X_C(t) = \frac{Q(t)}{I^2(t)};$$

$$g_C(t) = \frac{P(t)}{U^2(t)}; \quad b_C(t) = \frac{Q(t)}{U^2(t)}.$$

Поточні значення активної та реактивної потужностей та квадратів напруги і струму для АД можна визначити за формулами

$$P(t) = \frac{3}{T/2} \int_{t-T/2}^t u_{\alpha} i_{\alpha} dt; \quad Q(t) = \frac{-3}{T/2} \int_{t-T/2}^t u_{\alpha} i_{\beta} dt;$$

$$U^2(t) = \frac{3}{T/2} \int_{t-T/2}^t u_{\alpha}^2 dt; \quad I^2(t) = \frac{3}{T/2} \int_{t-T/2}^t i_{\alpha}^2 dt,$$

де u_{α}, u_{β} – складові напруги статора; i_{α}, i_{β} – складові струму статора.

Процеси під час пуску АД зручно характеризувати за допомогою колової діаграми $R_C=f(X_C)$, яку зображено на рис. 1. Для моделювання вибрано краново-металургійний двигун типу МТКН512-8 повторно-короткочасного режиму роботи (ПВ=25%) з номінальною потужністю 45 кВт. Моделювання виконано шляхом розв'язування системи нелінійних диференціальних рівнянь [9] з використанням методу Рунге-Кутта четвертого порядку.

Водночас, процес пуску АД в режимі холостого ходу і під навантаженням характеризується істотною відмінністю поточних значень активної (рис. 2) та реактивної (рис. 3) складових спектрального опорів. Таку відмінність можна пояснити тим, що розгін АД під навантаженням триває довше, а усталеному значенню частоти обертання ротора АД відповідає точка a на коловій діаграмі (рис. 1). Максимальне значення R_C (крива 1 на рис. 2) досягається за невеликого ковзання (рис. 4). Коловій діаграмі (рис. 1) адекватна чотирьохелементна схема заміщення АД (рис. 5), де прийняті такі позначення: R_{12} – опір обмотки статора та приведений опір обмотки ротора; X_{12} – індуктивний опір розсіювання обмотки статора та приведений індуктивний опір розсіювання обмо-

тки ротора; X_{μ} – індуктивний опір кола намагнічування; R_2 – приведений опір обмотки ротора; s – ковзання ротора.

Крім колової діаграми властивості АД також характеризує лінійна залежність $R_c/s = f(X_c)$ (рис. 6)

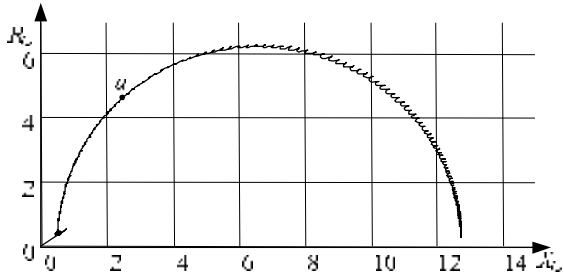


Рисунок 1 – Колова діаграма АД в режимі неробочого ходу

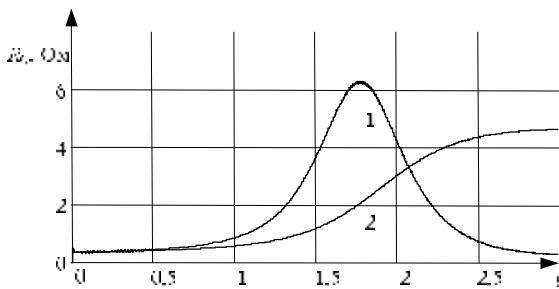


Рисунок 2 – Залежність поточних значень активної складової спектрального опору під час пуску АД в режимі неробочого ходу (1) і під навантаженням (2)

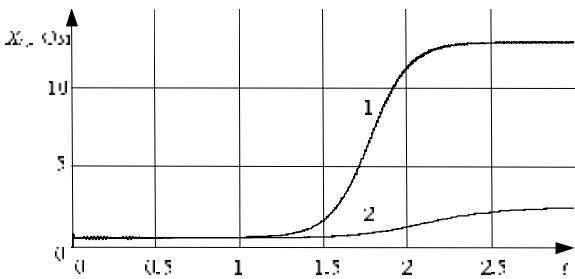


Рисунок 3 – Залежність поточних значень реактивної складової спектрального опору під час пуску АД в режимі неробочого ходу (1) і під навантаженням (2)

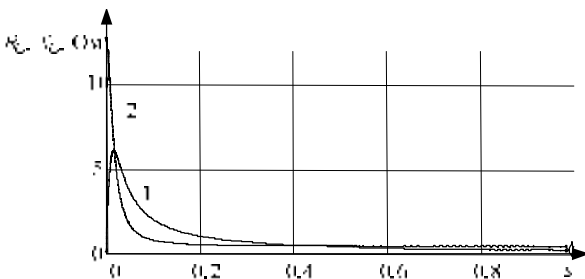


Рисунок 4 – Залежність складових спектрального опору АД від ковзання пуску в режимі неробочого ходу (1) і під навантаженням (2)

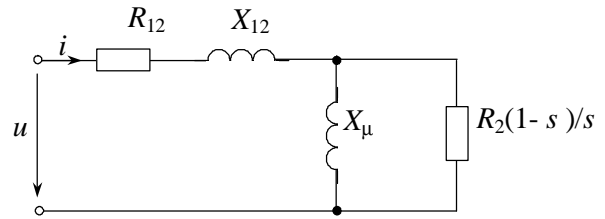


Рисунок 5 – Чотирьохелементна схема заміщення АД

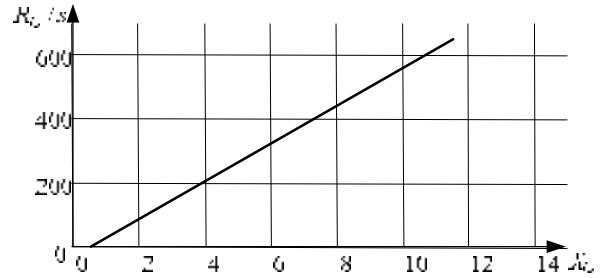


Рисунок 6 – Лінійна діаграма АД

Колова та лінійна діаграми є зручним інструментом для побудови вимірювальних систем електричних параметрів АД. Наприклад, зміщуючи лінійну діаграму вліво, можна зафіксувати момент компенсації індуктивного опору X_{12} , коли пряма буде проходити через початок координат. Для цього необхідно скористатись фазовим критерієм $R_c/sX_c = \text{const}$ або $\text{stg}\varphi_c = \text{const}$. В момент компенсації опору R_{12} максимум R_c досягається при $\text{tg}\varphi_c = 1$. В цей момент $R_c/sX_c = 1 + X_{\mu}/R_2$. З останнього виразу випливає, що $\text{stg}\varphi_c = R_2/(R_2 + X_{\mu})$.

Індивідуальна компенсація реактивної потужності в перехідних режимах. Пуск асинхронних двигунів характеризується значним споживанням реактивної потужності, яке для деяких типів двигунів перевищує споживання активної потужності. На рис. 7 зображено залежності активної P та реактивної Q потужностей під час пуску АД. В змінному режимі навантаження реактивна потужність залишається практично сталою.

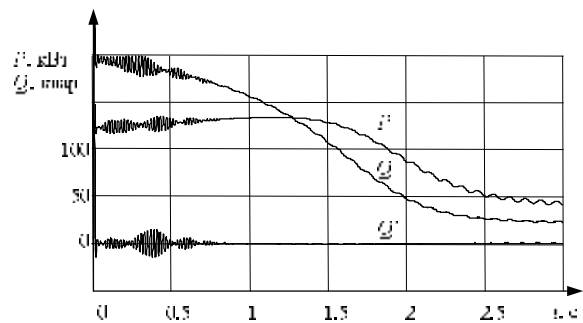


Рисунок 7 – Залежності поточних значень активної та реактивної потужностей АД

Значення коефіцієнта потужності λ_c (рис. 8) зростає в межах від 0,5 (при пуску) до 0,9 (в режимі номінального навантаження).

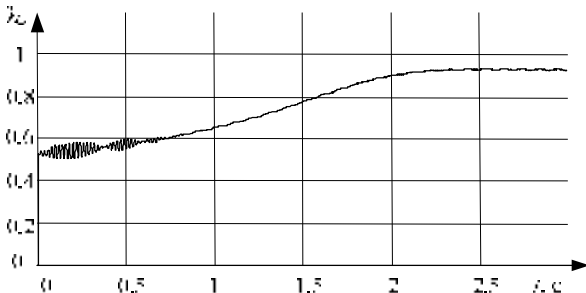


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнта потужності під час пуску та змінного режиму навантаження АД

На рис. 7 зображено також залежності поточних значень реактивної потужності Q' у разі компенсації реактивної потужності за критерієм $b_K = 0$. З порівняння залежностей реактивних потужностей Q та Q' випливає, що застосування критерію $b_K = 0$ забезпечує повну компенсацію реактивної потужності під час перехідних електромеханічних процесів. При цьому значення $\lambda_C \approx 1$.

Використання реактивної провідності b_F , визначеної на основі теорії Фрізе, приводить до перекомпенсації реактивної потужності під час пуску АД і до її недокомпенсації в змінному режимі навантаження. Використання реактивної провідності b_C приводить до перекомпенсації реактивної потужності як при пуску АД, так і в змінному режимі навантаження. Необхідно також відмітити, що коефіцієнт потужності λ не можна використовувати для оцінювання ефективності компенсації реактивної потужності, оскільки його значення більше за одиницю.

Залежності поточних значень модуля вектора струму статора під час пуску АД (рис. 9) наглядно показують, що використання індивідуальної компенсації реактивної потужності приводить до істотного зменшення струму статора (залежність 2) порівняно зі струмом до компенсації (залежність 1). В змінному режимі навантаження струм статора теж зменшується, однак при цьому дещо зростає розмах коливань струму.

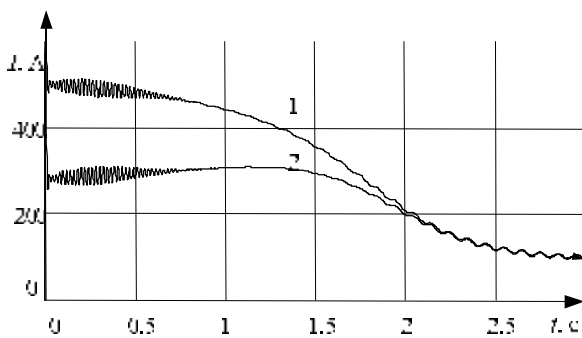


Рисунок 9 – Залежності поточних значень модуля вектора струму статора під час пуску АД

На рис. 10 наведено графіки залежностей поточ-

них значень реактивних провідності $b_K(t)$ під час пуску та змінного режиму навантаження АД, з якої випливає необхідний характер регулювання реактивної потужності в перехідному режимі.

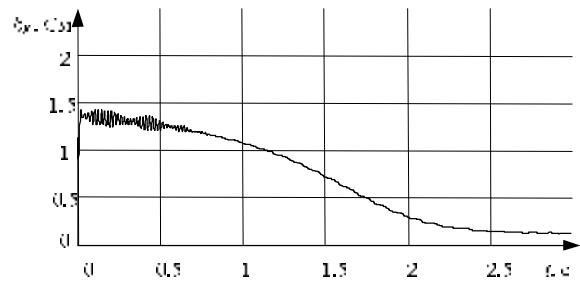


Рисунок 10 – Залежність спектральної провідності b_K під час пуску та змінного режиму навантаження АД

І хоча застосування критерію $b_K = 0$ забезпечує повну компенсацію реактивної потужності під час пуску АД, однак реалізація змінного значення $b_K(t)$ є достатньо складною задачею.

Зменшення знижень напруги під час пуску асинхронних двигунів з використанням індивідуальної компенсації реактивної потужності. Пускові струми АД з короткозамкненим ротором зумовлюють різке зниження напруги у вузлі мережі. Це, в свою чергу, призводить до зниження запасу стійкості вузлів навантажень. Одним із ефективних заходів підвищення рівня напруги під час пуску АД є індивідуальна компенсація реактивної потужності. У разі живлення АД типу МТКН512-8 від лінії та трансформатора, сумарний комплексний опір яких становить $\underline{Z} = 50 + j100$ мОм, амплітудне значення втрат фазної напруги під час пуску приблизно дорівнює 46 В (рис. 11).

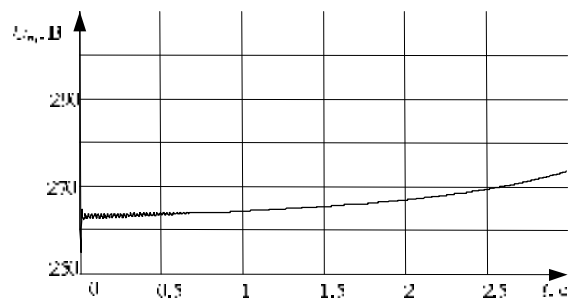


Рисунок 11 – Залежності модуля вектора фазної напруги під час пуску АД до компенсації

Надзвичайно важливим є врахування зворотного впливу зміни напруги у вузлі приєднання АД на споживання активної та реактивної потужностей. Для порівняння на рис. 12 наведено графіки споживання активної та реактивної потужностей під час пуску АД без КУ у разі зниження напруги із-за наявності опору лінії. Споживання активної та реактивної потужностей під час пуску істотно зменшується.

Пуск відбувається значно повільніше.

У разі дискретного регулювання під час пуску АД доцільно увімкнути потужність конденсаторної установки становить 70 квар, що забезпечить зменшення поточних значень модуля вектора струму до 340 А (рис. 13). Амплітудне значення втрат фазної напруги під час пуску зменшується до 35 В.

Увімкнення КУ приводить до збільшення споживання активної та реактивної потужностей АД. Пуск відбувається значно швидше. Для порівняння на рис. 14 наведено графіки споживання активної та реактивної потужностей одночасно АД та КУ.

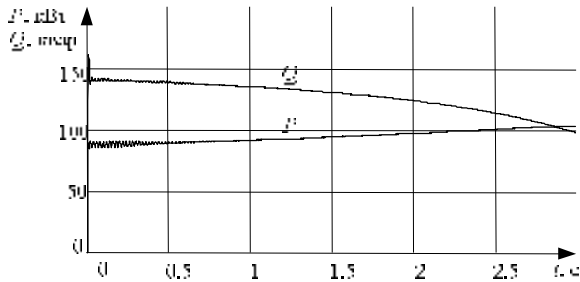


Рисунок 12 – Залежності активної та реактивної потужностей під час пуску АД без КУ

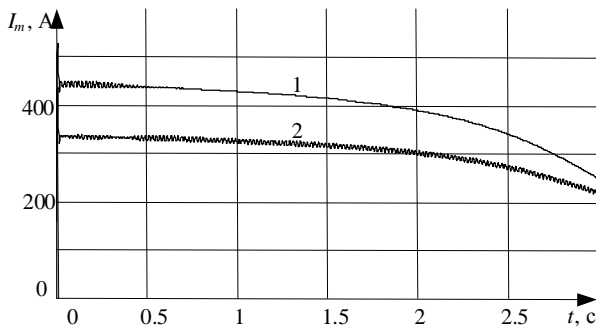


Рисунок 13 – Залежності модуля вектора струму статора під час пуску АД до (1) і після (2) компенсації

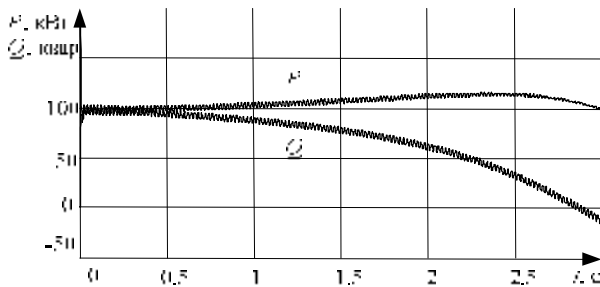


Рисунок 14 – Залежності активної та реактивної потужностей АД з КУ

Висновки. Таким чином, під час пуску АД для опису перехідних процесів та керування пристроями індивідуальної компенсації реактивної потужності можуть бути використані спектральні параметри, які доцільно характеризувати їх поточними значеннями. Найбільш ефективним для керування компенсацій-

ними установками є застосування реактивної провідності $b_K(t)$. Для спрощення реалізації пристроїв індивідуальної компенсації достатньо увімкнути конденсатори такої потужності, які забезпечують приблизно однакове споживання активної та реактивної потужностей в початковий момент пуску АД.

ЛІТЕРАТУРА

1. Войтех А.А., Попович А.Н., Бирик Е.В. Учет коэффициента мощности при оптимизации электро-механических систем для переходных и квазиустановившихся режимов работы // Технічна електродинаміка. – 2003. – №2. – С. 36 – 42.
2. Войтех А.А., Попович А.Н., Бирик Е.В. Математическая модель оптимального проектирования асинхронного двигателя с предвключенными конденсаторами для тяжелых условий пуска // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2002. – №1. – С. 361 – 363.
3. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентиляльных преобразователей. – Новосибирск: Изд.-во Новосиб. ун-та. 1990. – 220 с.
4. Штамбергер Г.А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравнивания) / Под ред. К.Б. Карандеева. – Новосибирск: Наука, 1972. – 164 с.
5. Солодуха Я. Ю. Тенденции компенсации реактивной мощности. Ч. 2. Методы и средства компенсации реактивной мощности // Электротехн. пром-сть. Сер. 05: Обзор. информ. – М.: Информэлектро, 1988. – Вып. 21. – 49 с.
6. Czarnecki L.S. What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1987. – Vol. 36, No 3. – P. 834–837.
7. Czarnecki L.S. Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1988. – Vol. 37, No 1. – P. 30–34.
8. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 4-е изд. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер. – 2006. – 463 с.
9. Беспалов В.Я., Мощинский Ю.А., Петров А.П. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе координат // Электричество. – 2002. – №8. – С. 33 – 39.

Стаття надійшла 13.04.2008 р.