

УДК 621.371: 621.314.4

О. І. Дорошенко, канд., техн. наук
Г. О. Дробот,
М. С. Левакін

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

***Анотація.** Спираючись на фізику процесів створення електромагнітного поля електроенергетичної системи, пропонується вважати, що таке поле системи електропостачання будь-якого споживача електроенергії створюється за рахунок перетворення її потенційної форми (напруги) в електромагнітних полях елементів такої системи і є їх сумою. При цьому, повна розрахункова потужність системи пропорційна до напруги джерела живлення системи, а її активна потужність – до поздовжньої складової згаданої напруги.*

***Ключові слова:** електроенергетична система, електромагнітне поле, активна та реактивна електроенергія, реально-математична модель системи електропостачання промислових споживачів.*

А. И. Дорошенко, канд., техн. наук
Г. А. Дробот,
М. С. Левакин

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

***Аннотация.** Опираясь на физику процессов создания электромагнитного поля электроэнергетической системы, предлагается считать, что такое поле системы электроснабжения любого потребителя электроэнергии создается в результате преобразования ее потенциальной, формы (напряжения) в электромагнитных полях элементов такой системы и есть их суммой. При этом, полная расчетная мощность системы пропорциональна напряжению источника питания системы, а ее активная мощность – его продольной составляющей.*

***Ключевые слова:** электроэнергетическая система, электромагнитное поле, активная и реактивная электроэнергия, реально-математическая модель системы электроснабжения промышленных потребителей.*

A. I. Doroshenko, PhD., tech. Sciences
G. A. Drobot
N. S. Levakin

THE PHYSICAL BASIS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE POWER SUPPLY SYSTEM INDUSTRIAL ENERGY CONSUMERS

***Abstract.** Based on the physics of the processes of creation of the electromagnetic field of the electric power system, it is proposed to assume that such a field system of an electrical supply to any consumer of electricity is created by converting its potential form (voltage) to the electromagnetic fields of the elements of such a system and is their sum. In this case, the full computational power of the system is proportional to the voltage of the power supply system, and its active capacity of the longitudinal component of the said voltage.*

***Keywords:** electric power system, electromagnetic field, active and reactive power, real-mathematical model of the power supply system for industrial consumers.*

Вступ. З теоретичної електротехніки (ТОЕ), наприклад, з [1] відомо, що електрична енергія (електроенергія), фізично, є енергією електромагнітного поля електроенергетичної системи (ЕЕС), яке створюється одночасною дією напруги та струму провідності струмоведучих частин кожного елемента згаданої системи на електрично пружне діелектричне середовище, що оточує такі час-

тини. При цьому, цілком ясно, що поле не може бути окремим видом матерії (як стверджується в нормативному документі [2]) і є лише таким її станом, за якого в ній починають діяти сили, які можуть виконувати певний вид корисної роботи.

Електроенергію, як товарну продукцію ЕЕС, що виробляється промисловим способом (у великих обсягах і, помірковано, недо-

рого) в [3] пропонується вважати роботою генераторів електростанцій такої системи, яку вони виконують для створення різниці потенціалів (напруги) на своїх затискачах. Достеменно відомо, що таку напругу електропередавальні організації (ЕО), за допомогою власних електричних мереж (ЕМ) поставляють в системи електропостачання (СЕП), які розглядаються, завжди, як підсистеми ЕЕС.

Об'єктом дослідження цієї роботи є СЕП конкретного споживача електроенергії (як підсистеми ЕЕС), а мета цього дослідження – розроблення реально-математичної моделі СЕП, яка спирається на фізику процесів її електроспоживання і може бути корисною для дослідження та аналізу нормальних режимів роботи такої системи.

Аналіз відомих рішень. Теоретично, в [1] електромагнітне поле розкладається на дві складові (електричне і магнітне) і, математично, повна потужність такого поля визначається за теоремою Умова-Пойтинга, яка за синусоїдально змінних напруги і струму провідності струмоведучих частин будь-якого електричного кола представляється у вигляді, кВА

$$S = E \times H + \Delta P = U \cdot I, \quad (1)$$

де E - напруженість умовного електричного поля СЕП, що розглядається, В/м; H - напруженість умовного магнітного поля СЕП, А/м; ΔP - втрати активної потужності в струмоведучих частинах кола струму провідності СЕП, кВт; U - діюче значення напруги у точці розподілу балансової належності електричних мереж споживача електроенергії, СЕП якого розглядається, та ЕЕС, кВ; I - діюче значення струму провідності струмоведучих частин СЕП, А.

Зважаючи на рівняння (1), поточне значення повної потужності поля можна визначити за допомогою відомого рівняння, кВА

$$\begin{aligned} s &= u \cdot i = U_m \sin \varphi \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= \sqrt{2}U \sin \varphi \cdot \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= 2UI(\sin \varphi \cdot \sin(\omega t - \varphi)) = \\ &= UI(\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)), \end{aligned} \quad (2)$$

де u - миттєве значення синусоїдальної напруги у точці балансової належності електричних мереж споживача електроенергії, кВ; i - миттєве значення синусоїдального

струму провідності СЕП, що відстає від синусоїдальної напруги на фазовий кут φ , А; U_m - амплітудне значення згаданої напруги, кВ; I_m - амплітудне значення згаданого струму, А; U - діюче значення згаданої напруги, кВ; I - діюче значення згаданого струму, А.

Як можна бачити, перша складова рівняння (2) не залежить від часу, а його друга складова змінюється двічі протягом періоду зміни напруги і струму провідності струмоведучих частин системи. При цьому добуток їх діючих значень ($U \cdot I$) цієї складової, на відміну від першої складової, є її амплітудним значенням. Таким чином, повна потужність СЕП має бути функцією часу –

$$s = f(t). \quad (3)$$

Зазвичай, першу складову рівняння (2) називають активною потужністю ЕЕС і визначають, кВт

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (4)$$

Другу складову цього рівняння називають реактивною потужністю ЕЕС і визначають, квар

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi, \quad (5)$$

підмінюючи тим самим її амплітудне значення діючим значенням, яке менше ніж перше у $\sqrt{2}$ разів.

При цьому повна потужність СЕП вважається величиною незмінною, яку визначають за відомою формулою, кВА

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (6)$$

Спираючись на фізику створення полів (наприклад, [4]), вважають активну потужність P потужністю електричного поля, яке створюється дією електричних зарядів (сили Кулона). Реактивна потужність Q вважається потужністю магнітного поля яке створюється дією сил Кариоліса.

Зважаючи на те, що реально існує єдине, фізично, не подільне електромагнітне поле необхідно з'ясувати як воно створюється в СЕП конкретного споживача електроенергії і як пов'язана напруга, що живить споживача, та його активне і реактивне навантаження.

Результати дослідження. Як відомо з [5], електромагнітне поле може створюватись і реально існувати тільки в електрично пружному діелектричному середовищі, що оточує усі струмоведучі частини ЕЕС. Таке

пояснюється фізикою електричного зв'язку між електричними зарядами атомів і молекул речовин, з яких побудовано електротехнічні матеріали – провідники і діелектрики.

Відомо, що провідники – прості речовини (метали) найменшою частинкою яких є атоми. Атом – елементарний об'єм електрично організованої матерії (фізичного вакууму (ФВ)), за якого у його центрі сконцентровано позитивно заряджені елементарні частинки ФВ – фітони (позитрони), а навколо них, за нормальних умов, під дією вселенського електромагнітного поля, за круговими орбітами, обертаються негативні заряди окремих фітонів, що утворюють атом (електрони). При цьому, електрон не є окремою елементарною частинкою (її маса відсутня), а лише властивість зарядженої елементарної частинки до взаємодії з подібною до себе частинкою. Якщо фітон власного заряду не проявляє, то його називають нейтроном.

У атомів провідників існує електричний зв'язок на атомному рівні, за якого кожен його протон утримує на круговій орбіті тільки один електрон. Такий зв'язок не може бути сильним і, за наявності різниці потенціалів різних точок такого провідника, електрони його атомів стають вільними, рухаючись за спіральною траєкторією (переходять на кругові орбіти інших його атомів), створюючи у ньому струм провідності.

Діелектрики – складні речовини. Найменшою їх частинкою є молекула, яка є сукупністю декількох атомів, об'єднаних електричним зв'язком на молекулярному рівні. За такого зв'язку кожен позитрон кожного атому молекули, за нормальних умов, утримує на кругових орбітах електрони інших атомів цієї молекули. Такий зв'язок вважається сильним і струм провідності таких речовин значно утруднюється. Спроба електронів у атомів таких речовин стати вільними є, за якої їх орбіти набувають форми овалу, створюючи при цьому, струм зміщення у середовищі діелектрика. Не значний за величиною струм провідності діелектрика називають струмом витоку, який призводить до втрат енергії у ньому та до його нагрівання. Значний струм провідності у діелектрику означає його пробій (пошкодження).

Таким чином, електромагнітне поле ЕЕС може створюватись тільки у її електрично

пружному діелектричному середовищі одночасною дією на нього синусоїдальних напруги і струму провідності струмоведучих частин системи. При цьому, напруга стискає таке середовище (переважно, у поперечному напрямку електропередачі), а струм його розтягує (переважно, у поздовжньому напрямку електропередачі).

При цьому, діелектричне середовище ЕЕС можна розглядати у якості умовної “пружини”, що працює, одночасно, у двох напрямках – уздовж і поперек напрямку електропередачі (рис.1).

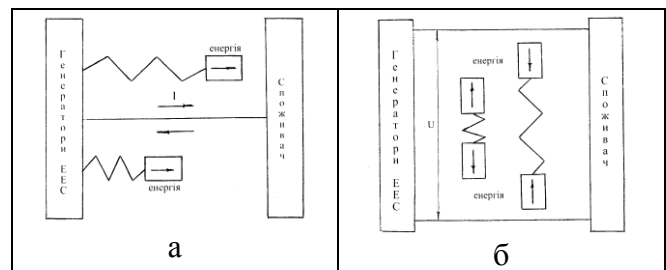


Рис.1. Фізика роботи електропередачі

Очевидно, що один кінець такої пружини у поздовжньому напрямку електропередачі глухо закріплюють генератори електростанцій ЕЕС (рис.1,а), а у поперечному напрямку електропередачі обидва кінці такої пружини вільні (рис.1,б).

Як можна бачити, не залежно від стану такої пружини у поздовжньому напрямку електропередачі (рис.1,а), її стиснено чи розтягнуто, енергію такої пружини буде передано тільки до споживача.

Енергія цієї пружини у поперечному напрямку електропередачі (рис.1,б) може бути переданою тільки у середину струмоведучих частин електропередачі, провідне середовище яких не є електрично пружним і поля у ньому, фізично, бути не може. Але, через явище електромагнітної індукції, у ньому створюється електрорушійна сила самоіндукції (ЕРС), під дією якої створюється струм самоіндукції, що одержав назву реактивного струму (як реакція електропередачі на власне електромагнітне поле). За законом Ленца, такий струм, у будь-який момент часу, має напрямок протилежний струму, що поступає від джерела живлення. Ні до споживача, ні від нього реактивна енергія передаватись, фізично, не може, [6]. При цьому зростають активні втрати електропередачі, зменшується

її пропускна спроможність і значно змінюється напруга, що суперечить вимогам [7].

Як було доведено вище, математична модель електромагнітного поля електропередачі за формулою (6) має похибку, обумовлену заміною фізичного процесу його існування математичним описом.

Приймаючи до уваги синусоїдальність напруги і струму провідності згаданих частин системи, в [6] зроблено висновок про те, що ліва частина рівняння (2) є функцією $\sin\varphi$, а його права частина – $\cos\varphi$.

З урахуванням цього, за допомогою математичного середовища MATHCAD, рівняння (2) було представлено в [8] у вигляді залежності $s = f(\sin x)$, рис.2.

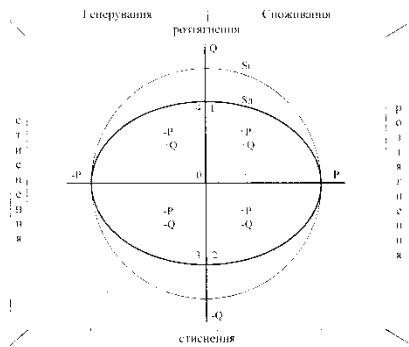


Рис.2. Хвилеподібний вихор енергії електромагнітного поля ЕЕС

За аналогією з реальною пружиною, знак перед P та Q означає стан діелектричного середовища ЕЕС: знак плюс (+) – середовище розтягнене, що відповідає споживанню енергії; знак мінус (–) – середовище стиснене, що відповідає генеруванню енергії.

На рис.3 представлено складові енергії електроенергетичного поля СЕП.

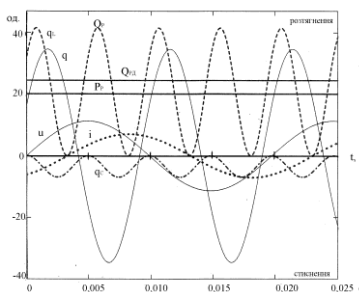


Рис.3. Складові реактивної електроенергії

При цьому, приймаються такі позначення: q_c - дія напруги; q_l - дія струму провідності; q - загальний результат.

Очевидно, що синусоїдальна напруга струмоведучих частин електропередачі, за допомогою їх ємності, періодично стискає умовну “пружину” її діелектричного середовища, а струм їх провідності, за допомогою їх індуктивності, – розтягує,

Реактивна електроенергія є невід’ємною складовою процесу створення електромагнітного поля будь-якої електроенергетичної системи, але у інші види енергії не перетворюється (не споживається). Вона забезпечує енергію електромагнітного поля системи виду вихору енергії поляризації її електрично пружного діелектричного середовища яка хвилеподібно переміщується від джерела живлення СЕП до її електроприймачів (споживачів активної електроенергії).

Таким чином, рівняння (2) можна вважати математичною моделлю електромагнітного поля системи, яка в середовищі MATHCAD набуває вигляду рис.4.

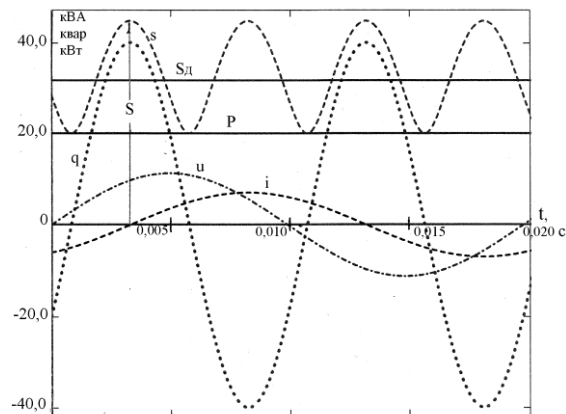


Рис.4. Графічне уявлення складових рівняння (2)

Таким чином, робочим інструментом будь-якого електроприймача СЕП є його електромагнітне поле, а сума енергій таких полів складає загальну енергію електромагнітного поля системи.

Оскільки струм навантаження СЕП конкретного споживача створюється в її струмоведучих частинах під дією напруги, що надходить від ЕЕС, то напругу можна вважати потенційною формою електроенергії, яка перетворюється в електромагнітне поле такої системи в електродинамічну, яка у спромозі виконувати певний вид корисної роботи.

Таким чином, електроенергія, як товарна продукція ЕЕС, що виробляється промисловим способом (у великих обсягах і, помірко-

вано, не дорого) є роботою, що виконується генераторами такої системи для створення різниці потенціалів (напруги) на їх затискачах. Саме таку напругу ЕО, за допомогою власних електричних мереж поставляють до СЕП конкретних споживачів.

Фізично, процес передавання і створення електрокінетичного виду електроенергії, яка, безпосередньо, може виконувати роботу в СЕП конкретного споживача залежить від кута зсуву фаз напруги і струму провідності струмоведучих частин системи та відбувається, практично, одночасно. Сутність такого процесу, за струму провідності струмоведучих частин СЕП, що відстає від їх синусоїдальної напруги, пояснює рис.5, . .

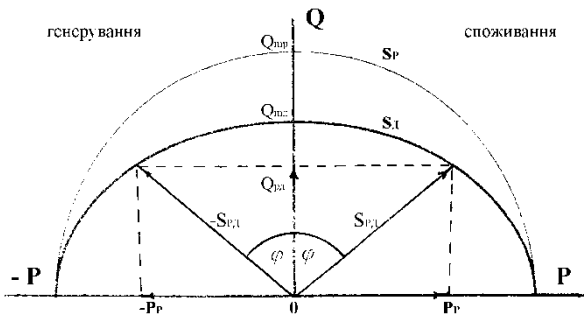


Рис.5. Процес одночасного створення і споживання електроенергії СЕП

При цьому прийнято такі позначення: s_p - поточне значення повного навантаження СЕП, кВА; s_ϕ - поточне діюче значення повного навантаження СЕП, кВА; S_p - діюче значення повного розрахункового навантаження СЕП, кВА; P_p - розрахункове активне навантаження СЕП, кВт; Q_{pm} - максимальне (амплітудне) значення розрахункового реактивного навантаження СЕП, квар; Q_{Dm} - максимально можлива величина діючого значення реактивного навантаження СЕП, квар; Q_{pD} - розрахункове діюче значення реактивного навантаження СЕП, квар.

Як можна бачити, перетворення електрорепотенційної форми електроенергії СЕП у електрокінетичну її форму відбувається при стисненому стані діелектричного середовища цієї системи у поздовжньому напрямку електропередачі і при розтягнутому у поперечному напрямку, під дією напруги її струмоведучих частин. Зважаючи на таке, модель

для розрахунку нормального режиму СЕП, з урахуванням рис.5, можна представити у вигляді рис.6, де прийнято такі позначення: U_1 - напруга джерела живлення СЕП, в.о.; U_2 - напруга у точці розподілу балансової належності електричних мереж споживача та ЕО, в.о.; δ - кут зсуву фаз напруг U_1 та U_2 , град.; I_p діюче значення розрахункового струму СЕП, А; φ - кут зсуву фаз розрахункового струму I_p та напруги U_2 , град.

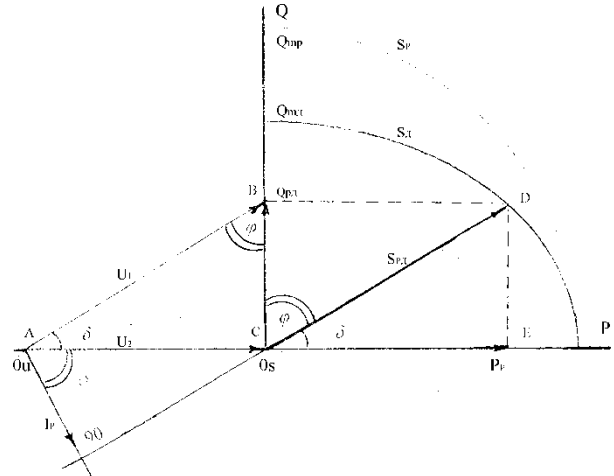


Рис.6. Реальний процес перетворення потенціальної форми електроенергії в СЕП

Приймаючи до уваги співвідношення

$$\left. \begin{aligned} U_1 &\equiv S_p \\ U_2 &\equiv P_p \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

можна зробити висновок

$$\delta + \varphi = 90^\circ. \quad (8)$$

Розглянемо наступний приклад СЕП споживача, що живиться від ЕЕС за принциповою схемою рис.7.

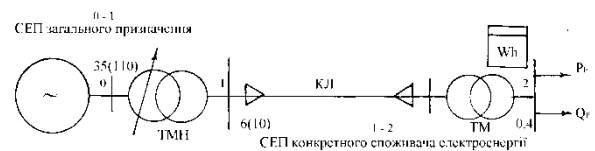


Рис.7. Схема СЕП типового споживача

Вихідні дані СЕП. Власна трансформаторна підстанція (ТП) промислового споживача електроенергії з трансформатором ТМ-1000/10, за допомогою кабеля ААБ-10-3х50, що має довжину 1,2 км, живиться від системної ТП з пристроєм автоматичного регулювання напруги під навантаженням (РПН) при номінальній напрузі 10 кВ. Точка розмежу-

вання електричних мереж ЕО і споживача – точка 1 (рис.7).

Розрахункове активне навантаження споживача складає величину $P_p = 550$ кВт, а розрахункове реактивне – $Q_p = 490$ квар. За звичай, це амплітудне значення хвилі поперечної складової енергії електромагнітного поля СЕП, що розглядається.

Методика розрахунку. Напряга U_1 у точці розмежування ЕМ (точка1) цієї схеми, за допомогою РПН, у розрахунковому періоді є незмінною і підтримується на рівні, кВ

$$U_1 = 1,05 \cdot U_{НОМ}. \quad (9)$$

Напряга на шинах навантаження (точка 2 на рис.7) у згаданому режимі визначається за формулою кВ

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{КЛ} - \Delta U_T \pm \Delta U_{ПБЗ}, \quad (10)$$

де $\Delta U_{КЛ}$ - втрати напруги в кабельній лінії, кВ; ΔU_T - втрати напруги в трансформаторі споживача, кВ; $\pm \Delta U_{ПБЗ}$ - добавка напруги за рахунок пристрою регулювання напруги (перемикання кількості витків первинної обмотки знижувального трансформатора споживача, без його збудження), кВ.

Параметри елементів заступної схеми СЕП, приведені до вторинної напруги знижувального трансформатора ТП споживача, можна визначити за відомими формулами:

Активний опір кабельної лінії

$$R_{КЛ} = r_0 \cdot L_{КЛ} \cdot U_{НОМ2}^2 / U_{НОМ1}^2 = 0,620 \cdot 1,2 \cdot \frac{0,4^2}{10^2} = 0,00119 \text{ Ом.}$$

Реактивний опір кабельної лінії

$$X_{КЛ} = x_0 \cdot L_{КЛ} \cdot U_{НОМ2}^2 / U_{НОМ1}^2 = 0,090 \cdot 1,2 \cdot \frac{0,4^2}{10^2} = 0,00017 \text{ Ом.}$$

Активний опір трансформатора

$$R_T = \frac{\Delta P_K}{1000} \cdot \frac{U_2^2}{S_T^2} = \frac{11}{1000} \cdot \frac{0,4^2}{1^2} = 0,00176 \text{ Ом.}$$

Реактивний опір трансформатора

$$X_T = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_2^2}{S_T} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{0,4^2}{1} = 0,00880 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний активний опір ЕМ

$$R_{ЕЕМ} = R_{КЛ} + R_T = 0,00119 + 0,00176 = 0,00295 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний реактивний опір ЕМ

$$X_{ЕЕМ} = X_{КЛ} + X_T = 0,00017 + 0,00880 = 0,00897 \text{ Ом.}$$

Втрата напруги в електричній мережі, що живить споживача

$$\Delta U_E = \frac{P_p \cdot R_{ЕЕМ} + Q_{пД} \cdot X_{ЕЕМ}}{U_{НОМ}} \cdot 10^{-3} = \frac{550 \cdot 0,00295 + 490 / \sqrt{2} \cdot 0,00897}{0,4} \cdot 10^{-3} = 0,012 \text{ кВ.}$$

Зважаючи на рівняння (8), можна визначити кут зсуву векторів U_1 та U_2 , град

$$\delta = 90^\circ - \varphi. \quad (11)$$

Очевидно, що значення φ , яке відповідає діючому значенню Q_p , можна визначити за формулою, град.

$$\varphi_D = a \tan \left| \frac{Q_p}{\sqrt{2} \cdot P_p} \right|. \quad (12)$$

При цьому

$$\varphi_D = a \tan \left(\frac{480}{\sqrt{2} \cdot 560} \right) = 31,2^\circ.$$

За значення величини $\pm \Delta U_{ПБЗ} = 0$ в рівнянні (10), з трикутника АВС на рис.6, можна визначити, кВ

$$U_2 + \Delta U_{КЛ} + \Delta U_T = U_1 \cdot \cos \varphi_D, \quad (13)$$

звідки,

$$U_2 = U_1 \cdot \cos \varphi_D - \Delta U_E = 1,05 \cdot \cos 31,2^\circ - 0,012 = 0,886 \text{ в.о.}$$

Очевидно, що таке значення напруги U_2 на шинах ТП споживача є недопустиме. Для його збільшення до допустимого значення необхідно зменшувати реактивне навантаження споживача за рахунок застосування пристроїв реактивної компенсації. За вимогою нормативного документа [9], воно повинно бути не меншим ніж $U_2 = 0,95 \cdot U_{НОМ}$.

Залежність такої напруги від реактивного навантаження споживачів СЕП загального електропостачання (точка 1 на рис.7), що розглядається наведено в табл.1.

Таблиця 1

Залежність $U_{2A} = f(tg\varphi_D)$

$tg\varphi_D$, в.о.	U_{2A} , в.о.	$tg\varphi_D$, в.о.	U_{2A} , в.о.
0,00	1,050	0,50	0,939
0,10	1,045	0,60	0,900
0,20	1,030	0,70	0,860
0,25	1,019	0,80	0,820
0,30	1,006	0,90	0,780
0,40	0,975	1,00	0,742

Як можна бачити, за умови:

$$tg\varphi_D = 0 \text{ в.о. } U_{2A} = 1,05 \cdot U_{НОМ} \text{ в.о.};$$

$$tg\varphi_D = 0,25 \text{ в.о. } U_{2A} = 1,019 \cdot U_{НОМ} \text{ в.о.};$$

$$tg\varphi_D = 0,60 \text{ в.о. } U_{2A} = 0,900 \cdot U_{НОМ} \text{ в.о.}$$

Таким чином, для СЕП загального призначення, що розглядається, за умови $tg\varphi_D > 0,60$ в.о., коли $U_{2A} < 0,90 \cdot U_{НОМ}$ в.о., її електромагнітна сумісність з ЕЕС, без компенсації реактивного навантаження СЕП конкретних споживачів електроенергії є незадовільною.

Висновки

1. Електромагнітне поле СЕП будь-якого споживача електроенергії є її робочим інструментом, який перетворює потенційний (універсальний) стан такої енергії (напругу струмоведучих частин ЕЕС) у стан, за якого електроприймачі у змозі виконувати корисну роботу конкретного виду.

2. Повне навантаження СЕП будь-якого споживача електроенергії необхідно вважати пропорційною до величини напруги джерела її живлення, а активну потужність її навантаження – пропорційною до величини напруги точки балансового розмежування ЕМ споживача і ЕО.

3. З метою забезпечення електромагнітної сумісності в ЕЕС, в максимальному режимі будь-якій СЕП необхідно забезпечувати умову $tg\varphi_D \leq 0,43$ в.о.

4. Відхилення напруги у будь-якій точці електричних мереж СЕП необхідно вважати головною умовою забезпечення електромагнітної сумісності елементів такої системи.

5. Реально-математична модель СЕП, що пропонується в даній роботі, розкриває фізичну сутність процесів і забезпечує достовір-

ність результатам їх математичному визначенню.

Список використаної літератури

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Изд. 6-е. Учебник для студ. энергетич. и электротехнич. вузов [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Высш. школа, 1973. – 752 с.

2. ДСТУ 2843-94. Державний стандарт України. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення [Текст]. – Київ: Держстандарт України, 2005. – 66 с.

3. Дорошенко О. І. Що до роздрібної ціни на електроенергію [Текст] / О. І. Дорошенко, С. О. Борисенко // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – №2/1 [22]. – С. 27 – 32.

4. Ландау Л. Д. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика [Текст] / Л. Д. Ландау, А. И. Ахиезер, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука: Главная редакция физико-математической литературы. 1969. – 399 с.

5. Богородицкий Н. П. Электротехнические материалы [Текст] / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, В. М. Тареев. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ие. 1985. – 304 с.

6. Дорошенко О. І. Реально-математична модель електромагнітного поля електропередачі [Текст] / О. І. Дорошенко, Т. О. Дручина, М. С. Левакін // Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів». 6 – 10 листопада 2015 р. – Кременчук. – С.12 – 13.

7. Методика визначення нераціонального (неефективного) використання паливно-енергетичних ресурсів [Текст] / Національне агентство України з питань забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів. – Київ: – 2009. – 117 с.

8. Дорошенко О. І. Визначення впливу реактивного навантаження електроенергійної системи на виток її електроенергії [Текст] / О. І. Дорошенко, К. С. Гусак, О. В. Романюк // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Одеса, 2015. – № 20 (96). – С. 22 – 29.

9. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнит-

ная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст] / – Минск: Издательство стандартов, 1998. – 31 с.

Одержано 03.01. 2016

References

1. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovi elektrotehniki Izd. Izd. 6-e. Uchebnik dlya stud. enerhetich. i elektrontchnich vuzov [Theoretical foundations of electrical engineering. Ed. 6. a Textbook for students. Energetic. and electrotechnics. Universities]. (1973), *Higher School*, Moskva – p. 752. (In Russian).

2. DSTU 2843-94. Derzhauyi standart Ukraini Elektrotehnikhnika. Osnovni poniatia. Terminy ta vyznachennia [DSTU 2843-94. State standard of Ukraine. Electrical engineering. Basic concepts. Terms and definitions]. (2005). Kyiv, 2009 – p. 66. (In Ukrainian).

3. Doroshenko O. I. Shchodo rozdrubnoy zini na electroenergiu [What to Rostro CNI to electroenergy / O. I. Doroshenko, S. O. Borisenko] // *Technology audit and production reserves*. – 2015. – №2/1 (22). – P. 27 – 32.

4. Landau L.D. Kurs obchey fyziki. *Mechanika I molekulyarnaya fyzika*. [Course of General physics. Mechanics and molecular physics]. (1969) / L. D. Landau, A. I. Akhiezer, E. M. Lifshitz. // М.: Izd. "Science", Main edition of physico-mathematical literature. – 399 p. (In Russian).

5. Bogoroditsky N. P. *Elektrotechnicheskie materiali: Uchebnik dlya vuzov. 7-e izd.* [Electrical materials: Textbook for universities. 7-e Izd.]. (1985) / N. P. Bogoroditsky, V. V. Pasynkov, V. M. Tareev // L.: Energoatomizdat. Leningrad. DEP-s. – 304 p. (In Russian).

6. Doroshenko O. I. Realno-matematicheskaya model tlektrovahnitnoho polia elektropredachi [Real-mathematical model of electromagnetic field power] / A. I. Doroshenko, T. A. Druzina, M. S. Levakin // *Materials of XIV international scientific and technical conference "Physical processes and fields of technical and biological objects"*. 6 – 10 November 2015 – Kremenchug. – S. 12 – 13.

7. The national Agency of Ukraine W the sues of the effective zabezpechennya energetichnih resursiv. Sovereign spekta W energozberezhennya. Methodology vyznachennya

efficient (efficient when trying) palivno-energetichnih resursiv. Kyiv, 2009. – P. 17. (In Ukrainian).

8. Doroshenko O. I. Vyznachennia vplivu reaktivnoho navantazhennia elektroenergeticheskoy cictemi na poteri ee elektroenergii [To determine the effect of reactive loads of the power system to turn its power] / A. I. Doroshenko, K. S. Goose, A. V. Romanyuk // *Electrotechnical and computer systems*. – Odessa, 2015. – № 20 (96). – pp. 22 – 29.

9. GOST 13109-97. Mezhosudfrstvenyi standart elektricheskaiia energsia. Sovmestimost technicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Normy kachestva elektricheskaiia energii v ssstemach elektrosnsbzhennia obshchego naznachennia (1998) – P. 31. (In Ukrainian).



Дорошенко
Олександр Іванович,
к.т.н., доц. каф. електро-
постачання та енергоме-
неджменту Одеського нац.
політехнічного ун-ту.
м/т: 067-267-95-89,
e-mail: dai1938@yandex.ua



Дробот
Галина Олександрівна,
ас. Херсон. політехнічного
коледжу Одеського нац.
політехнічного ун-ту.
м/т: 099-373-58-67.
e-mail: drobotg@mail.ua



Левакін
Максим Сергійович,
маг. каф. електропостача-
ння та енергоменеджмен-
ту Одеського нац. політе-
хнічного ун-ту.
м/т: 050-146-01-80.
madmaxlad@mail.ru