

## МЕТОДИКА НОРМУВАННЯ ГОЛОВНОГО КРИТЕРІЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИМ І ДОРІВНЕНИМ ДО НИХ СПОЖИВАЧАМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

О. І. Дорошенко, А. С. Пасько

Одеський національний політехнічний університет

**Анотація.** Спираючись на сучасну квантову фізику, пропонується оригінальний підхід до принципу електропередавання промисловим і дорівненим до них споживачам електроенергії, яка вважає її електроустановкою, що передає згаданим споживачам електричну напругу, як потенційну форму електромагнітної енергії. Розкривається технічна сутність методики визначення нормативного значення коефіцієнта реактивного навантаження системи електропостачання конкретному споживачу електроенергії, за якого гарантовано додержується електромагнітна сумісність згаданої системи і визначається економічна сутність такої методики.

**Ключові слова:** реально-математичне моделювання в електроенергетиці, квантування електрично пружного діелектричного середовища системи електропостачання, електромагнітне поле, головний критерій електромагнітної сумісності електроенергетичних систем.

### Вступ

Як відомо, робочим інструментом системи електропередавання будь-якому споживачеві електроенергії – системи електропостачання (СЕР) є її електромагнітне поле, яке є сукупністю електромагнітних полів усіх її елементів. При цьому, у відповідності до нормативного документа [1], СЕР будь-якого споживача електроенергії є сукупністю джерела електричної напруги і електричної мережі, яка приєднує до нього пункт прийому (ПП) згаданої напруги в СЕР споживача, що розглядається.

Очевидно, що СЕР конкретного споживача електроенергії є підсистемою загальної електроенергетичної системи (ЕЕС), як технологічної

підсистеми електроенергетики кожної країни, з будь-яким політичним і економічним устроєм.

Зважаючи на те, що робота генераторів електростанцій ЕЕС полягає у тому, що вони створюють на своїх затискачах різницю потенціалів – напругу, то її можна вважати товарною продукцією ЕЕС, яку енергопостачальні організації (ЕО) за допомогою власних електричних мереж і мереж споживачів постачають до ПП в їх СЕР. При цьому, величина напруги електропередавання, як електроустановки, визначається потужністю навантаження споживача і відстанню від джерела живлення в ЕЕС до ПП в його СЕР, рис.1.

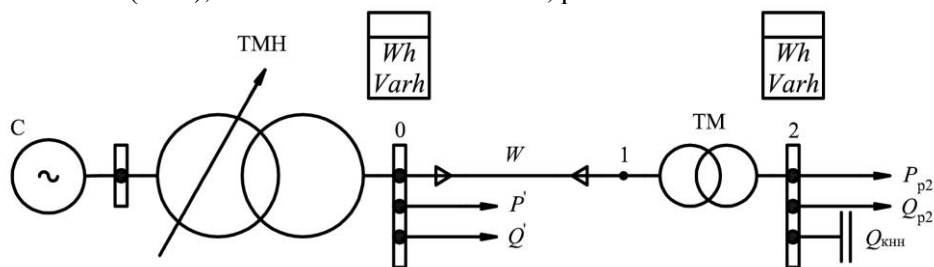


Рис.1. Принципова схема СЕР промислового споживача електроенергії

Як можна бачити, точка 0 рис.1 є джерелом живлення споживача, яка знаходиться в межах ЕЕС, яку називають СЕР загального призначення і є точкою генераторної напруги електростанції або точкою вторинної напруги системної трансформаторної підстанції, де здійснюється регулювання під навантаженням (РПН) без переривання електропостачання. Крім того, це точка

© Дорошенко О. І., Пасько А. С., 2019

розмежування балансової належності електричних мереж ЕО і конкретного споживача електроенергії, де розташовується комерційний облік спожитої у розрахунковому періоді (календарний місяць) електроенергії  $Wh$ . Її контрольний варіант розміщується або у точці 1 (якщо є така можливість), або у точці 2 на шинах вторинної напруги  $U_{ном} = 0,4$  кВ знижувального трансформатора СЕР споживача типу ТМ, де є можли-

вість здійснення регулювання її величини перемиканням числа витків первинної обмотки такого трансформатора, без збудження (ПБЗ) – з відмиканням від джерела напруги.

Таким чином, в межах до точки 0 діє СЕП загального призначення, яку називають електроенергетичною системою, між точками 0 і 1 діє СЕП зовнішнього електропостачання конкретного споживача, а за точкою 2 – СЕП його внутрішнього електропостачання.

Електроприймачі споживача, як реальні електроустановки його СЕП за допомогою власних електромагнітних полів перетворюють потенційну форму електроенергії у її діючу форму, яка крутить, світить або нагріває, виконуючи конкретну корисну роботу. При цьому, можна упевнено стверджувати про те, що електропередавання (передавання споживачам напруги, встановленої нормативним документом на державному рівні якості, [3]) є головною технологічною задачею будь-якої СЕП.

Об'єктом дослідження даної роботи є система зовнішнього електропостачання (передавання напруги) конкретному промислового (що виробляє конкретну промислову продукцію) або дорівненому до нього (що виробляє певний вид послуг) споживачу електроенергії середньої потужності (до 1000 кВт), за типовою принциповою схемою рис.1.

Мета дослідження полягає у тому, щоб спираючись на пропозицію [3] та на нормативні документи [2] та [4], розробити методику нормування згаданим споживачам електроенергії величини головного критерію електромагнітної сумісності їх СЕП в умовах нормального робочого режиму для успішного виконання триєдиної задачі електроенергетики – безпечне, економічне і безперервне постачання споживачам електроенергії, установленої на державному рівні якості. Такі нормативні значення коефіцієнта реактивного навантаження СЕП необхідно затвердити на державному рівні з метою економічного контролю відповідними державними установами.

### Результати дослідження

Спираючись на [5] та [6], в роботі [3], пропонується створення в системах електропостачання електромагнітних полів пояснювати процесом квантування електрично-пружного діелектричного середовища електроустановок. Фізично, квантування означає спотворення кругових електромагнітних полів окремих молекул діелектричного середовища, згаданої СЕП, одночасною дією на них напруги і струму провідності струмоведучих частин системи за безпосереднього

впливу на них магнітного поля Землі, як обов'язкової складової її поля гравітації (відповідно до закону парності), що діє постійно. Такі спотворені поля молекул діелектричного середовища СЕП в [5] одержали назву квантонів, рис.2.

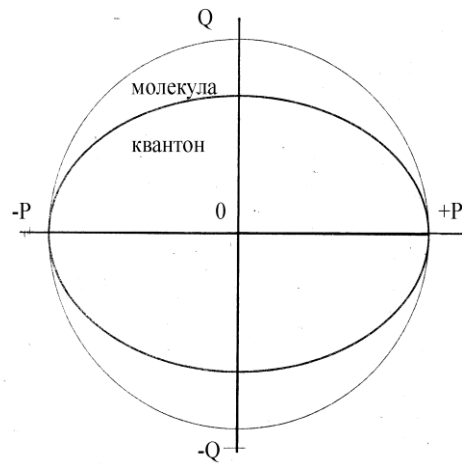


Рис.2. Можливий вигляд квантона

Очевидно, що в електроенергетиці, як в складовій частині реально існуючого Всесвіту, діють однакові загальні закони і правила. Три таких закони, які в [7], названі головними, є такими: закон всесвітньої взаємодії; закон парності; закон збереження енергії.

Спираючись на теоретичну електротехніку (наприклад, на [8]), робочим інструментом СЕП будь-якого споживача електроенергії можна вважати її електромагнітне поле, яке створюється квантуванням електрично-пружного діелектричного середовища, що оточує усі струмоведучі частини системи.

Як упевнено визначено в [9], таке середовище є електрично-пружним через матеріальність його будови. Саме тому, в [3] наголошується про те, що електромагнітне поле – це такий стан матеріального діелектричного середовища електроустановки, за якого у ньому починають діяти електричні і магнітні сили (за твердженням [8], сили Кулона і сили Кориоліса). Таке визначення поля суперечить нормативному документу [10], де полем називається «...особливий вид матерії...» (яка має бути універсальним будівельним матеріалом, з якого побудовано усі об'єкти Природи і тому, фізично, видів мати не може).

За твердженням [9], пружність діелектриків визначається фізикою будови їх елементарних частинок (як складних речовин) – молекул. Можливу будову молекули діелектричного середовища будь-яких струмоведучих частин, будь-яких елементів СЕП представлено на рис.3, а.

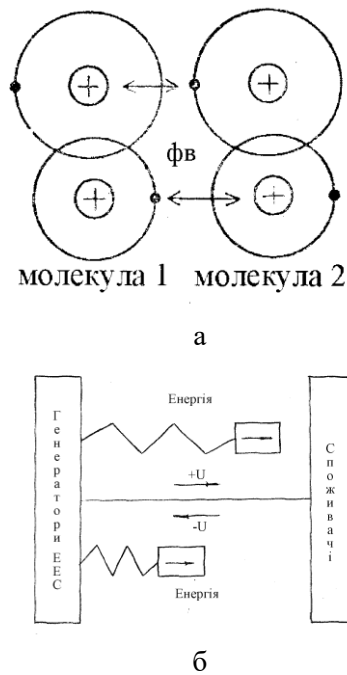


Рис.3. Принцип дії молекули діелектрика

Як можна бачити, з урахуванням розміру атомів, з яких створено молекули діелектрика, є елементарні частинки матерії (фізичного вакууму – ФВ), які не належать жодному з її атомів. Під дією напруги джерела живлення електропередавання (як діючої електроустановки) електрони таких фітонів стають вільними і створюють в діелектричному середовищі струмоведучих частин струм провідності – струм витоку, який переходить в струмоведучі частини. На місце електронів ФВ, які стали вільними, зміщуються електрони атомів молекул, створюючи в діелектричному середовищі також струм зміщення. Таким чином, молекули діелектрика мають діяти як реальна пружина (рис.3,б).

На місце електронів струму зміщення в атомах молекули діелектрика переходять електрони вузла провідного середовища, створюючи додатковий струм провідності струмоведучих частин у поперечному напрямку до напрямку електропередавання.

Таким чином, напруга джерела живлення створює у провідному середовищі струм провідності за двома напрямками – до джерела напруги і до його вузла у бік електропередавання. При цьому, сусідні вузли кристалічної решітки струмоведучих частин електропередавання періодично набувають різниці електричних потенціалів і в струмоведучих частинах електропередавання створюється умови, за яких струм їх провідності передає напругу від його початку (точка 0 на рис.1) до його кінця (точка 1 на рис.1).

З появою струму витоку в діелектрику, електрони атомів його молекул зміщуються зі своїх

кругових орбіт на місце електронів ФВ, які стали вільними, що створили струм витоку. При цьому кругові орбіти електронів молекул діелектрика набувають виду овалів направлених у бік електропередавання, створивши квантон, рис.4.

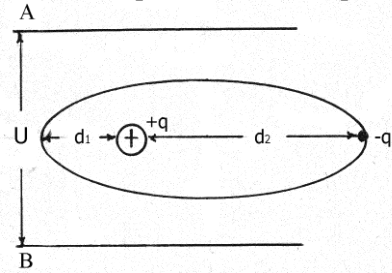


Рис.4. Можливий вигляд квантона

Вісь квантона –  $P$  співпадає з напрямком електропередавання, а вісь  $Q$  – перпендикулярна до такого напрямку. Зважаючи на принцип суперпозиції, який широко застосовується в теоретичній електротехніці, загальне електромагнітне поле СЕП можна представляти у вигляді загального квантона, як її електромагнітне поле.

Математично, дію трифазного поля представляє відоме рівняння, яке спирається на теорему Пойтинга

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I, \quad (1)$$

де  $S$  – повне значення потужності поля, (вважається, що це її діюче значення, кВА;  $U$  – діюче значення синусоїдальної напруги, кВ;  $I$  – діюче значення синусоїдального струму провідності, А.

Зважаючи на схеми вмикання вимірювальних приладів електромагнітної енергії, рівняння (1) можна представити у вигляді

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi - \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(2 \cdot \omega t - \varphi) = P + J \cdot Q, \quad (2)$$

де  $\varphi$  – кут зсуву фаз миттєвих значень синусоїдальних напруги і струму провідності струмоведучих частин ЕЕС, градус;  $P$  – активна потужність електромагнітного поля, яка вважається його поздовжньою складовою, що передається споживачам електроенергії, кВт;  $Q$  – реактивна потужність електромагнітного поля, яка вважається поперечною складовою (за напрямком електропередавання) і є внутрішньою енергією поля (за його межі не виходить), квар.

Очевидно, що зважаючи на рівняння (2), можна розглядати згаданий квантон СЕП з двох точок зору: напруга її струмоведучих частин – магнітне поле Землі; струм провідності струмоведучих частин – магнітне поле Землі. Тобто, цілком можливо, умовно, розкласти загальний квантон системи на два квантони: квантон на-

пруги –  $U$  і квантон струму провідності –  $I$ , які діють у об'ємі тілесного кута  $90^\circ$  поляризованого діелектричного простору СЕП і обертаються навколо вісі  $P$ , за напрямком електропередавання.

Можливий вигляд квантона  $U$  співпадає з виглядом загального квантона, представленого на рис. 4.

Очевидно, що у цьому випадку мають діяти електричні сили між позитивним і негативним зарядами спотвореного, зазвичай, кругового поля молекули діелектрика (сили Кулона).

$$F_U = \frac{q^2}{d_2^2} - \frac{q^2}{d_1^2} = \frac{q^2}{d_2^2 - d_1^2} \text{ од.} \quad (3)$$

За твердженням [11], робота таких сил становить, од.

$$A_U = F_U \cdot (d_2 - d_1) \cdot \cos \varphi, \quad (4)$$

де  $\varphi$  - кут між напрямком дії сили і можливим напрямком руху матерії, град. У даному випадку  $\varphi = 0$ , відповідно до першої частини рівняння (4).

При цьому, діелектрик діє як пружина, яку періодично стискає магнітне поле Землі. У позитивний півперіод напруги працює діелектрик прямого проводу електропередавання, а у негативний – зворотній. При цьому, енергія квантона передається споживачеві без зміни її величини і являє собою активну енергію, яку визначає перша складова рівняння (2), позначена літерою  $P$ .

На рис.5 представлено можливий вигляд умовного квантона  $I$ .

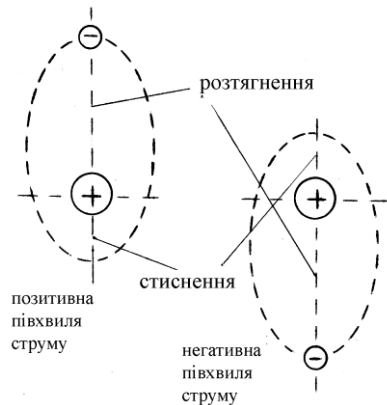


Рис.5. Умовний квантон електропередавання  $I$

На відміну від квантона  $U$ , цей квантон працює у напрямку поперечному до напрямку електропередавання і періодично. Таке в [11] пояснюється тим, що у цьому випадку працюють механічні сили – сили Кориоліса. Це сили, які утримують на орбіті об'єкт, що обертається на-

вколо певної вісі. Їх роботу визначає друга складова рівняння (2). Але на відміну від квантона  $U$ , робота квантона  $I$  змінюється за синусоїдальним законом від амплітудного значення  $+A_1$  до  $-A_1$  двічі кожного півперіоду зміни струму провідності струмоведучих частин електропередавання.

Таким чином, друга складова рівняння (2), яка позначається літерою  $Q$ , як реактивна енергія електропередавання, має змінюватися за синусоїдальним законом чотири рази протягом періоду струму провідності електропередавання так, як було доведено в [12].

Як можна бачити, електрони загального квантона електропередавання намагаються обертатись навколо його позитивного заряду, одночасно, у двох напрямках – вздовж і впоперек напрямку електропередавання. Не зважаючи на різну фізику дії таких квантонів (в квантоні  $U$  діють сили Кулона, а в квантоні  $I$  – сили Кориоліса), їх вклад в енергетику загального квантона можна вважати однаковим (струм створюється напругою). Саме тому кут між напрямком їх дії в загальному квантоні має складати величину  $45^\circ$ .

Зважаючи на таке припущення, квантово-векторну модель будь-якої СЕП за струму провідності, який відстає від напруги на фазовий кут  $\varphi$ , можна уявляти так, як викладено далі у даній статті.

До точки 1 рис.1 (як ПП електроенергії) діє напруга, яку поставляє ЕЕС, а за цією точкою – електромагнітне поле, створене електроприймачами конкретного споживача електроенергії за наявності згаданої напруги.

На рис.6 представлено трикутник напруги точки 1.

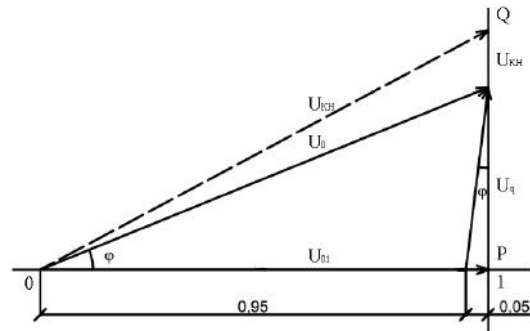


Рис.6. Діаграма напруги ПП СЕП

При цьому напруга  $U_1$  пов'язана з напругою  $U_0$  відомим співвідношенням, кВ

$$U_1 = U_0 \cdot \cos \varphi - \Delta U_P - \Delta U_Q \geq 0,95 \cdot U_{НОМ}, \quad (5)$$

де  $\Delta U_p$  - втрати напруги електропередавання, залежні тільки від його активного навантаження, кВ;  $\Delta U_Q$  - втрати напруги електропередавання, залежні тільки від його реактивного навантаження.

Зважаючи на те, що активні втрати напруги електропередавання є не відворотними, а реактивні – не обов'язкові, в роботі [3] рівняння (5) було представлено у вигляді, в.о.

$$U_1 = \cos\varphi - a \cdot \operatorname{tg}\varphi_D = 0,05, \quad (6)$$

де  $a$  - характеристичний коефіцієнт електричної мережі електропередавання, який визначається за відомою формулою:

$$a = X_E / R_E, \text{ в.о.}; \quad (7)$$

$\operatorname{tg}\varphi_D$  - діюче значення тангенса фазового кута  $\varphi$  між напругою і струмом провідності електропередавання, який визначається за відомою формулою, в.о.

$$\operatorname{tg}\varphi_D = Q_{D1} / P_{P1}, \quad (8)$$

де  $Q_{D1}$  - діюче значення реактивного навантаження споживача електроенергії, приведене до точки джерела його живлення, квар;  $P_{P1}$  - розрахункове значення активного навантаження споживача електроенергії, приведене до точки джерела його живлення, кВт.

При цьому, приймається

$$\cos\varphi = \cos(\operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\varphi_1)) \text{ в.о.} \quad (9)$$

Спираючись на рівняння (9), в роботі [3] було визначено нормативні значення  $\operatorname{tg}\varphi_H$  для алюмінієвих і мідних кабельних ліній електропередавання з номінальною напругою 6 – 35 кВ, за

яких забезпечується умова рівняння (5). Такі значення цього коефіцієнта можна вважати у якості головного критерію електромагнітної сумісності СЕП конкретного споживача електроенергії і рекомендувати визначення потужності конденсаторної установки з напругою  $U_{НОМ} = 0,4$  кВ (для вмикання у точці 2) за формулою

$$Q_{КНН} = \sqrt{2} \cdot P_{P1} \cdot (\operatorname{tg}\varphi_{D1} - \operatorname{tg}\varphi_H) \text{ квар.} \quad (10)$$

Очевидно, що діюче значення коефіцієнта реактивного навантаження СЕП, визначене за формулою (8), можна вважати її еквівалентом реактивної потужності (ЕЕРП).

У якості прикладу застосування методики, що пропонується для визначення ступеня електромагнітної сумісності СЕП конкретному промислому споживачу електроенергії, принципову схему якого представлено на рис. 1.

Як відомо, усі електроенергетичні розрахунки пов'язані із застосуванням заступних схем, які є своєрідним містком для переходу від фізики робочого процесу, що розглядається, до його математики і навпаки, заступну схему до принципової схеми СЕП, що розглядається представлено на рис. 7.

Як можна бачити, електроприймачі СЕП споживача (діючі електроустановки, як перетворювачі потенційної форми електромагнітної енергії у діючу) живляться при напрузі 0,4 кВ від власного знижувального трансформатора типу ТМ-400-6/0,4 кВ, який має змогу до регулювання вторинної напруги із застосуванням пристрою ПБЗ, схему дії якого пояснює рис.8, та в табл.1 наведені числові значення коефіцієнтів трансформції, залежно від положення перемикача П.

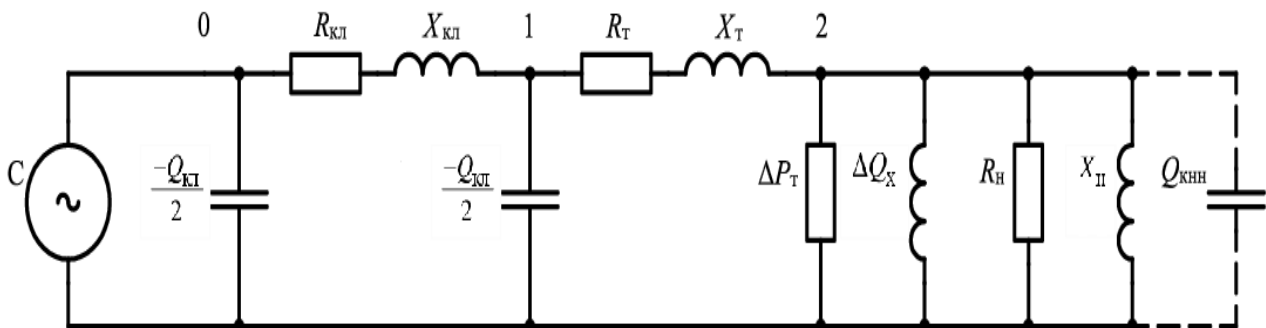


Рис.7. Заступна схема конкретної СЕП

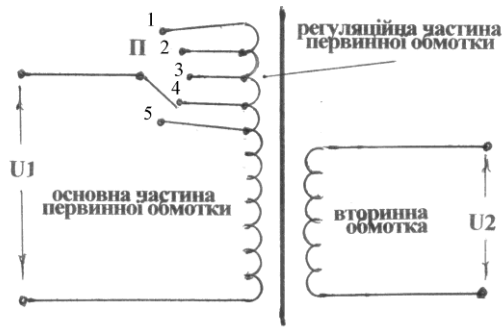


Рис. 8. Схема пристрою ПБЗ

 Таблиця 1  
 Коефіцієнти трансформації ПБЗ

П, од.	$K_{TP}$ , %	$U_2$ , в.о.
1.	-5,0	0,950
2.	-2,5	0,975
3.	0,0	1,000
4.	+2,5	1,025
5.	+5,0	1,050

За даним [14], основними характеристиками такого трансформатора є:

Номинальна потужність –  $S_{HT} = 400$  кВА.

Номинальна напруга:

Первинна –  $U_1 = 6$  кВ.

Вторинна –  $U_2 = 0,4$  кВ.

Короткого замикання –  $U_K = 4,5$  %.

Струм неробочого ходу –  $I_X = 2,1$  %.

Активні втрати:

Неробочого ходу –  $\Delta P_{X1} = 0,820$  кВт.

Короткого замикання –  $\Delta P_K = 5,5$  кВт.

Амплітудне значення реактивних втрат неробочого ходу трансформатора можна визначити за формулою

$$\Delta Q_X = \sqrt{S_X^2 - \Delta P_X^2} = \sqrt{\left(\frac{I_X \cdot S_{HT}}{100}\right)^2 - \Delta P_X^2} = \sqrt{\left(\frac{2,1 \cdot 400}{100}\right)^2 - 0,820^2} = 8,360 \text{ квар}$$

Реактивний опір трансформатора визначається відомою формулою

$$X_T = \frac{U_K \cdot U_2^2 \cdot 10}{S_{HT}} = \frac{4,5 \cdot 0,4^2 \cdot 10}{400} = 0,0180 \text{ Ом}$$

Трансформатор СЕП приєднано до шин вторинної напруги системної підстанції з номінальною вторинною напругою  $U_0 = 6,3$  кВ, де здійснюється автоматичне регулювання напруги за допомогою пристрою РПН.

Кабель з алюмінієвими жилами і паперовою просоченою ізоляцією типу ААБ-6 -3х35 довжиною  $L_{KL} = 1,5$  км.

За даними [14], такий кабель має наступні погінні характеристики:

Активний опір  $r_0 = 0,890$  Ом/км.

Реактивний опір  $x_0 = 0,087$  Ом/км

Реактивна потужність  $q_0 = -4,600$  квар/км.

При цьому:

Активний опір кабельної лінії

$$R_{KL} = r_0 \cdot L_{KL} = 0,890 \cdot 1,5 = 1,3350 \text{ Ом.}$$

Реактивний опір кабельної лінії

$$X_{KL} = x_0 \cdot L_{KL} = 0,087 \cdot 1,5 = 0,1305 \text{ Ом.}$$

Власна реактивна потужність кабельної лінії

$$Q_{KL} = -q_0 \cdot L_{KL} / \sqrt{2} = -4,600 \cdot 1,5 / \sqrt{2} = -4,879 \text{ квар}$$

Визначення розрахункового (максимального) навантаження конкретного споживача електроенергії проводити пропонується за нормативним документом [13], який спирається на Закон України «Про електроенергетику», Правила користування електроенергією та Положення про державний енергетичний нагляд за режимами споживання електричної та теплової енергії.

Виміри проводяться в години ранкового (з 10<sup>00</sup> до 13<sup>00</sup>) та вечірнього (за його наявності з 18<sup>00</sup> до 21<sup>00</sup>) за допомогою послідовної фіксації показань засобами витоку активної і реактивної енергії. З шести таких показань максимальне значення:

Активної –  $wP$  кВт·год.

Реактивної –  $wQ$  квар·год.

Розрахункову потужність визначають за формулами:

Активну

$$P_p = \frac{wP}{0,5} \text{ кВт.} \quad (11)$$

Реактивну

$$Q_p = \frac{wQ}{0,5} \text{ квар.} \quad (12)$$

Контрольні виміри навантаження СЕП у години ранкового максимуму ЕЕС, проведені за методикою [13] при  $K_{TP} = 15,750$  в.о. трансформатора СЕП (за його напруга  $U_2 = 0,396$  кВ), та мають наступні значення витоку електроенергії:

Активної –  $wP = 120,0$  кВт·год.

Реактивної –  $wQ = 105,5$  квар · год.

При цьому

$$P_p = \frac{wP}{0,5} = \frac{120,0}{0,5} = 240,0 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_d = \frac{wQ}{0,5} = \frac{105,5}{0,5} = 211,0 \text{ квар.}$$

Таким чином:

Навантаження точки 2:

Активне

$$P_{P2} = 240,00 \text{ кВт.}$$

Реактивне діюче

$$Q_{D2} = 211,000 \text{ квар.}$$

Діюче значення коефіцієнта реактивного навантаження, як основного критерію електромагнітної сумісності становить

$$tg\varphi_{D2} = \frac{Q_{D2}}{P_{P2}} = \frac{211,000}{240,000} = 0,8792 \text{ в.о.}$$

При цьому, діюче значення коефіцієнта активної потужності СЕП складає

$$\begin{aligned} \cos\varphi_2 &= \cos(\text{atg}(tg\varphi_{D2})) = \\ &= \cos(\text{atg}(0,8792)) = 0,7510 \text{ в.о.} \end{aligned}$$

Діюче значення повного навантаження

$$\begin{aligned} S_{D2} &= \sqrt{P_{P2}^2 + Q_{D2}^2} = \\ &= \sqrt{240,000^2 + 211,000^2} = 319,564 \text{ кВА.} \end{aligned}$$

Діюче значення розрахункового струму навантаження

$$I_{D2} = \frac{S_{D2}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ2}} = \frac{319,564}{\sqrt{3} \cdot 0,396} = 465,9 \text{ А.}$$

Коефіцієнт навантаження трансформатора

$$\beta_T = \frac{S_{D2}}{S_{НОМТ}} = \frac{319,564}{400} = 0,799 \text{ в.о.}$$

Втрати в трансформаторі:

Активні

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= \Delta P_X + \Delta P_K \cdot \beta_{T2}^2 =, \\ &= 0,820 + 5,50 \cdot 0,799^2 = 4,330 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Реактивні

$$\begin{aligned} \Delta Q_T &= (\Delta Q_X + 3 \cdot I_{P2}^2 \cdot X_T \cdot 10^{-3}) / \sqrt{2} = (8,360 + \\ &+ 3 \cdot 465,9^2 \cdot 0,018 \cdot 10^{-3}) / \sqrt{2} = 14,228 \text{ квар.} \end{aligned}$$

Навантаження точки 1:

Активне

$$\begin{aligned} P_{P1} &= P_{P2} + \Delta P_T = 240,000 + \\ &+ 4,331 = 244,330 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Реактивне діюче

$$\begin{aligned} Q_{D1} &= Q_{D2} + \Delta Q_T - Q_{КЛ} = 211,000 + \\ &+ 14,228 - 4,879/2 = 222,789 \text{ квар.} \end{aligned}$$

Діюче значення основного критерію електромагнітної сумісності

$$tg\varphi_{D1} = \frac{Q_{D1}}{P_{P1}} = \frac{222,789}{244,330} = 0,9118 \text{ в.о.}$$

При цьому, діюче значення коефіцієнта активної потужності СЕП складає

$$\begin{aligned} \cos\varphi_1 &= \cos(\text{atg}(tg\varphi_{D01})) = \\ &= \cos(\text{atg}(0,9115)) = 0,7389 \text{ в.о.} \end{aligned}$$

Напруга приймального пункту СЕП  $U_1 = U_2 \cdot K_{TP} = 0,396 \cdot 15,750 = 6,237$  кВ.

Діюче значення повної потужності

$$\begin{aligned} S_{D1} &= \sqrt{P_{P1}^2 + Q_{D1}^2} = \\ &= \sqrt{244,330^2 + 222,789^2} = 330,654 \text{ кВА.} \end{aligned}$$

Діюче значення розрахункового струму

$$I_{D1} = \frac{S_{D1}}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{330,654}{\sqrt{3} \cdot 6,237} = 30,6 \text{ А.}$$

Активні втрати кабельної лінії

$$\begin{aligned} \Delta P_{КЛ} &= 3 \cdot I_1^2 \cdot R_{КЛ} \cdot 10^{-3} = \\ &= 3 \cdot 30,6^2 \cdot 1,3350 \cdot 10^{-3} = 3,752 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Реактивні втрати кабельної лінії

$$\begin{aligned} \Delta Q_{КЛ} &= 3 \cdot I_1^2 \cdot X_{КЛ} \cdot 10^{-3} / \sqrt{2} = \\ &= 3 \cdot 30,6^2 \cdot 0,1305 \cdot 10^{-3} / \sqrt{2} = 0,259 \text{ квар.} \end{aligned}$$

Навантаження точки 0:

Активне

$$\begin{aligned} P_{P0} &= P_{P1} + \Delta P_{КЛ} = \\ &= 244,330 + 3,752 = 248,083 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Реактивне діюче

$$\begin{aligned} Q_{D0} &= Q_{D1} + \Delta Q_{КЛ} - Q_{КЛ} / 2 = \\ &= 222,789 + 0,259 - 4,879/2 = 220,609 \text{ квар.} \end{aligned}$$

Діюче значення коефіцієнта реактивного навантаження

$$tg\varphi_{D0} = \frac{Q_{D0}}{P_{P0}} = \frac{220,609}{248,083} = 0,8893 \text{ в.о.}$$

При цьому, діюче значення коефіцієнта активної потужності СЕП складає  

$$\cos\varphi_0 = \cos(\operatorname{atg}(\operatorname{tg}\varphi_{D0})) =$$

$$= \cos(\operatorname{atg}(0,8893)) = 0,7473 \text{ в.о.}$$

За свідченням [3], у цьому випадку має бути  $\operatorname{tg}\varphi_H = 0,2503 \text{ в.о.}$

При цьому, потужність конденсаторної установки, з номінальною напругою її конденсаторів  $U_{НОМ} = 0,4 \text{ кВ}$ , визначається за формулою (10)

$$Q_{KH} = \sqrt{2} \cdot P_{P1} \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_H) =$$

$$= \sqrt{2} \cdot 244,330 \cdot (0,8893 - 0,2503) =$$

$$= 228,583 \text{ квар.}$$

Очевидно, що номінальну потужність такої конденсаторної установки необхідно визначати методом послідовного перебору її значень, в межах значення  $Q_{KH}$ , квар.

Зважаючи на залежність активних втрат електропередавання від його реактивного навантаження, спираючись на відому формулу

$$\Delta P = 3 \cdot I_p \cdot R \cdot 10^{-3} = \frac{(P_p^2 + Q_D^2)}{U_{НОМ}^2} \cdot R \cdot 10^{-3} =$$

$$= \frac{P_p^2}{U_{НОМ}^2} \cdot R \cdot 10^{-3} + \frac{Q_D^2}{U_{НОМ}^2} \cdot R \cdot 10^{-3} =$$

$$= \Delta P_p + \Delta P_Q \text{ кВт.}$$

Приймаючи активні втрати тільки від активного навантаження за умовну одиницю, коефіцієнт впливу реактивного навантаження на загальні активні втрати електропередавання можна представити у вигляді

$$K_{\Delta P} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_{D1}^2 - \operatorname{tg}\varphi_H^2}{1 + \operatorname{tg}\varphi_D^2} \text{ в.о.} \quad (13)$$

Для СЕП споживача електроенергії, що розглядається, без застосування компенсації власного реактивного навантаження складає величину

$$K_{\Delta P} = \frac{0,9118^2 - 0,2503}{1 + 0,9118^2} = 0,4198 \text{ в.о.}$$

Результати розрахунку за методикою, що пропонується, представлені в табл. 2.

Як можна бачити, в СЕП споживача електроенергії, що розглядається, необхідне (економічно доцільно) застосування компенсації її реактивного навантаження.

Таблиця 2

Оптимізація реактивного навантаження електропередавання СЕП

Параметри режиму	Потужність конденсаторної установки 0,4 кВ – $Q_{KH}$ , квар				
	0	228,583	224,204	220,0	225,0
$U_2$ , кВ	0,396	0,396	0,397	0,397	0,397
$P_{P2}$ , кВт	240,000	240,069	240,067	240,066	240,067
$Q_{D2}$ , квар	211,000	49,367	52,464	55,437	51,901
$\operatorname{tg}\varphi_{D2}$ , в.о.	0,8792	0,2056	0,2185	0,2309	0,2162
$\cos\varphi_{L2}$ , в.о.	0,7510	0,9795	0,9769	0,9744	0,9774
$S_{D2}$ , кВА	319,564	245,092	245,733	246,381	245,614
$I_{P2}$ , А	465,9	357,3	357,4	358,3	357,2
$\beta_T$ , в.о.	0,799	0,613	0,614	0,616	0,614
$\Delta P_T$ , кВт	4,330	2,885	2,896	2,907	2,894
$\Delta Q_T$ , квар	14,228	10,815	10,816	10,842	10,811
$P_{P1}$ , кВт	244,330	242,953	242,963	242,973	242,961
$Q_{D1}$ , квар	222,789	57,743	60,840	63,839	57,981
$\operatorname{tg}\varphi_{D1}$ , в.о.	0,9118	0,2377	0,2504	0,2627	0,2481
$\cos\varphi_{L1}$ , в.о.	0,7389	0,9729	0,9700	0,9672	0,9706
$S_{D1}$ , кВА	330,654	249,721	250,465	251,219	250,326
$U_1$ , кВ	6,237	6,237	6,253	6,253	6,253
$I_{P1}$ , А	30,6	23,1	23,1	23,2	23,1



## Оптимізація реактивного навантаження електропередавання СЕП

$\Delta P_{KL}$ , кВт	3,752	2,140	2,142	2,156	2,140
$\Delta Q_{KL}$ , квар	0,259	0,148	0,148	0,149	0,148
$P_{P0}$ , кВт	248,083	245,094	245,105	245,128	245,101
$Q_{D0}$ , квар	220,609	55,452	58,549	61,548	57,981
$tg\varphi_{D0}$ , в.о.	0,8893	0,2262	0,2389	0,2511	0,2366
$\cos\varphi_{L0}$ , в.о.	0,7473	0,9753	0,9726	0,9699	0,9731
$\Delta U_{KL}$ , кВ	0,057	0,053	0,053	0,052	0,053
$U_1$ , кВ	6,243	6,247	6,247	6,248	6,247
$U_2$ , кВ	0,396	0,397	0,397	0,397	0,397
$Q_{KH}$ , квар	228,583	-4,379	0,038	4,225	-0,764
$K_{\Delta P}$ , в.о.	0,4198	-0,0058	0,0001	0,0060	-0,0010

Як можна бачити, у цьому випадку, економічно доцільним є застосування конденсаторної установки з номінальною потужністю її конденсаторів 225 квар. При цьому, вартість активних втрат електропередавання не перебільшує вартість активного електроспоживання СЕП у розрахунковому періоді (календарний місяць) більше ніж на 1 %.

**Висновки.**

1. Товарною продукцією електроенергетики є електрична напруга, яку виробляють промисловим способом синхронні генератори її електростанцій, створюючи на своїх затискачах різницю електричних потенціалів.

2. Напруга – потенційна форма електромагнітної енергії, яку енергопередавальні організації за допомогою своїх власних електричних мереж і мереж конкретних споживачів електроенергії, як юридичних осіб, передають її до приймальних пунктів напруги в СЕП таких споживачів.

3. Робочим інструментом будь-якого елемента будь-якої ЕЕС є їх електромагнітне поле, яке створюється в їх електрично-пружному діелектричному середовищі одночасною дією напруги і струму провідності їх струмоведучих частин, за постійного впливу магнітного поля Землі, як складової її поля гравітації (відповідно до матеріалістичного закону парності).

4. Електромагнітне поле електропередавання, як діючої установки СЕП конкретного споживача електроенергії, є фізичною і математичною сумою таких полів усіх її елементів.

5. Фізично, напруга електропередавання передається в СЕП конкретному споживачу електроенергії за допомогою його струмоведучих частин, в яких постійно циркулює струм витоку їх

діелектричного середовища, не залежно від навантаження згаданої системи.

6. Електроприймачі споживача електроенергії, як діючі електроустановки за допомогою власних електромагнітних полів перетворюють потенційну форму електроенергії у діючу для виконання конкретної корисної роботи (крутять, світять, нагрівають), збільшуючи струм провідності електропередавання.

7. Струм провідності електропередавання, фізично, має дві складові: поздовжню (у напрямку до джерела напруги) – активний струм; поперечну (у напрямку до молекул електрично-пружного матеріального діелектричного середовища для компенсації їх струму зміщення) – реактивний струм.

8. Створення струму зміщення в молекулах діелектрика призводить до їх квантування, за якого кругове поле молекул діелектричного середовища набуває вигляду овалу (квантона), орієнтованого у напрямку електропередавання.

9. Математично, квантування можна розглядати як математичне поєднання фізичного стану матерії (фізичного вакууму) молекули діелектричного середовища струмоведучих частин СЕП з часом тривалості такого його стану.

10. Спираючись на принцип суперпозиції, електромагнітне поле системи електропостачання електроенергії можна представити у вигляді квантона, що діє одночасно в поздовжньому і поперечному напрямках електропередавання.

11. Математично, квантон системи електропостачання можна розкласти на дві частини, розглядаючи їх окремо: у поздовжньому напрямку (квантон  $U$ ); у поперечному напрямку (квантон  $I$ ).

12. Енергія електромагнітного поля СЕП конкретного споживача електроенергії – це хвиля енергії квантування її діелектричного середовища, що біжить від джерела живлення до електроприймачів, як перетворювачів потенційної енергії у діючу.

13. Реактивна енергія електропередавання, фізично, не може бути товарною продукцією електроенергетичної системи і має розглядатись як реакція дії такої системи на власне електромагнітне поле.

14. Коефіцієнт реактивного навантаження СЕП можна вважати економічним еквівалентом її реактивного навантаження, який необхідно нормувати у залежності від питомих параметрів струмоведучих частин її електропередавання, залежно від принципової схеми її зовнішньої частини.

15. Нормативне значення коефіцієнта реактивного навантаження СЕП конкретному споживачу електроенергії визначається методом перебору його можливих значень і приймається таким, за якого величина відхилення напруги її ПП не перебільшує значення 5%.

16. Сучасна, діюча методика визначення потужності пристроїв компенсації реактивного навантаження СЕП споживачам електроенергії [15] не спирається на фізику електропередавання і має бути переробленою.

### Список використаної літератури

1. Правила устройства электроустановок [Текст] / –Х.: Изд-во «Форт», 2017. –704 с.

2. ГОСТ 13109–97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст] / – Минск: Издательство стандартов, 1998. – 31 с.

3. Дорошенко, О. І. Про нормування реактивного навантаження електропередавання промисловим і дорівненим до них споживачам електроенергії [Текст] / О. І. Дорошенко, С. О. Борисенко, П. П. Ненов, А. С. Пасько // Електроенергетичні та комп'ютерні системи. – Астропринт, 2019. – № 30(106). – С. 54–62.

4. Постанова про внесення змін та доповнень до Правил користування електричною енергією. Постанова НКРЕ № 928 від 22 вересня 2002 р. [Текст] Одеса, 2003. – 99 с.

5. Леонов, В. С. Теория упругой квантованной среды [Текст] / В. С. Леонов // Мн.: Биспринт, 1996. – 156 с.

6. Леонов, В. С. Теория упругой квантованной среды. Часть 2. Новые источники энергии.

[Текст] / В. С. Леонов // Минск: «ПолиБиг», 1997.– 122 с.

7. Копылов, И. П. Великие законы природы [Текст] / И. П. Копылов // Электричество. – 2011. – № 4. – С. 63–66.

8. 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.

9. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. – 7-е издание [Текст] / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. // – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. Отд-ние, 1985. – 304 с.

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

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

12. Дорошенко, О. І. Про моделювання в електропостачанні [Текст] / О. І. Дорошенко, С. О. Борисенко, П. П. Ненов // Електроенергетичні та комп'ютерні системи. Спеціальний випуск. Астропринт, 2017. –№ 25(101).– С.168–176.

13. Методика проведення контрольних вимірів фактичної електричної потужності в споживачів у години максимуму навантаження об'єднаної енергетичної системи України [Текст] / Видавництво «Форт». Харків, 2004. – 11 с.

14. Справочник по проектированию электрических сетей [Текст] / Под редакцией Д. Л. Файбисовича.– М.: Изд. НИЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.

15. Нормативний документ. Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача (основного споживача та субспоживача). [Текст] / Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики». Київ, 2006. – 71 с.

### References

1. (2017). Rules of the device of electrical installations [Pravila ulashtuvannia electroustanovok]. Kharkiv, Ukraine: Fort Publishing House, p. 704.

2. (1998). GOST 13109-97. Interstate standard. Electricity. The compatibility of the technical means is electromagnetic. Electricity quality standards in general-purpose electrical supply systems [GOST 13109-97. Mezgosudarstveniy standart. Electric-

eskaya energiya. Sovmestimost technicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah electrosnabzheniya obshchego naznacheniya]. Minsk, Belarus: Standards Publishing House, p. 31.

3. Doroshenko, O., Borisenko, O., Nenov, P. and Pasko, A. (2019). About the normalization of the reactive load of electricity transmission to industrial and energy consumers equal to them [Pro normuvannya reaktivnogo navantazennia electropredavannya promislovim i dorivnenim do nih spozhivachiam electroenergii]. *Electricity and computer systems*, 30 (106), pp. 54–62.

4. (2002). Regulation on Amendments to the Electricity Regulations. NERC Resolution No. 928 of September 22 [Postanova pro vnesennia zmin ta dopovnen do Pravil koristuvannya elektrichnoy energiyu. Postanova NKRE # 928 vid 22 veresnia 2002 r.]. Odesa, Ukraine: p. 99.

5. Leonov, V. (1996). Theory of an elastic quantized medium [Teoriya uprugoi kvantovoi sredy]. Minsk, Belarus: Bisprint, p. 156.

6. Leonov, V. (1997). Theory of an elastic quantized medium. Part 2. New energy sources [Teoriya uprugoi kvantovoi sredy. Chast 2. Novie istochniki energii]. Minsk, Belarus: PolyBig, p. 122.

7. Kopylov, I. (2011). The Great Laws of Nature [Velikiye zakony prirody]. *Electricity*, 4, pp. 63–66.

8 Bessonov, L. (1973). Theoretical foundations of electrical engineering. Textbook for students. energy. and electrical engineering. high schools [Teoreticheskiye osnovy electrotechniki. Uchebnic dlya studentov energeticheskikh i electrotechnicheskikh vuzov], 6th ed. Moscow, Russia: Higher school, p. 752.

9. Bogoroditsky, N., Pasyukov, V. and Tareev, B. (1985). Electrotechnical materials [Electrotechnicheskiye materialy], 7th ed. Leningrad (Saint Petersburg), Russia: Energoatomizdat, p. 304.

10. (2005). DSTU 2843-94. State standard of

Ukraine. Electrical engineering. Basic concepts. Terms and definitions [DSTU 2843-94. Derzhavniy standart Ukraini. Electrotechnika. Osnovni poniattia. Terminy ta viznachennia]. Kiev, Ukraine: Gosstandart of Ukraine, p. 66.

11. Landau, L., Akhiezer, A. and Lifshitz, E. (1969). Course of General Physics. Mechanics and Molecular Physics [Curs obschey fiziki. Mekhanika i moleculyarnaya fizika]. Moscow, Russia: Science, p. 399.

12. Doroshenko, O., Borysenko, S. and Nenov, P. (2017). About modeling in power supply [Pro modelyuvannya v electropostachanni]. *Power and computer systems*, 25(101), pp. 168–176.

13. (2004). Methodology of conducting measurements of actual electric power in consumers at hours of maximum load of the unified energy system of Ukraine [Metodika provedennia kontrolnich vimiriv factichnoyi elektrichnoyi potuznosti v spozhivachiv u godini maksimumu navantazhennia obiednanoi energetichnoi sistemy Ukraini]. Kharkiv, Ukraine: Fort, p. 11.

14. Faibisovich, D. (2006). Handbook on designing electrical networks [Spravochnik po projectirovaniyu elektricheskikh setei]. Moscow, Russia: Publishing House of the National Enas Center, p. 320.

15. (2006). Regulatory document. Methodology of you-value of economically reasonable amounts of compensation compensation for the reactive energy flowing between the electricity networks of the transmission organization and the consumer (main consumer and sub-consumer) [Normativnyi dokument. Metodyka vyznachennia ekonomichno dotsilnykh obsiahiv kompensatsii re-aktyvnoi enerhii, yaka peretikaie mizh elektrych-nymy merezhamy electropredavalnoi orhani-zatsii ta spozhyvacha (osnovnoho spozhyvacha ta subsposhyvacha)]. Kyiv, Ukraine: Association of Energy Enterprises "Industry Reserve and Investment Fund for Energy Development, p. 71.

## MAIN ELECTROMAGNETIC COMPABILITY CRITERIA DEFINITION METHOD OF ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS BY INDUSTRIAL AND EQUAL TO INDUSTRIAL ELECTRICAL ENERGY CONSUMERS

A. I. Doroshenko, A. S. Pasko  
Odesa National Polytechnic University

**Abstract.** Based on modern quantum physics, an original approach to the principle of electricity transmission to industrial and related consumers of electricity is proposed, which considers it to be an electrical installation that transmits electrical voltage to these consumers as a potential form of electromagnetic energy. Electrical voltage is considered as commodity energy product. Consumers' electric receivers convert a potential form of electricity into an active one, increasing the current of conduction of electricity transmission. The conductivity current has a longitudinal (active current acting in the direction of the voltage source) and transverse (jet current acting in the direction of the molecules of the electroelastic material dielectric

medium to compensate for their bias current). The bias current leads to the quantization of dielectric molecules, in which the circular field takes the form of an oval (quanton) oriented in the direction of the transmission. Mathematically, quantization is considered as the combination of the physical state of matter of a molecule of a dielectric medium with the duration of such a state. Due to this, based on the principle of superposition, the electromagnetic field of the power supply system is represented as a quanton, acting simultaneously in the longitudinal and transverse directions of the transmission. The energy of the field of the power supply system is a wave of quantization of its dielectric medium, which runs from the power source to the electric receivers. The reactive load factor can be considered the economic equivalent of the reactive load, which must be normalized depending on the specific parameters of the current-carrying parts of the transmission, depending on the schematic diagram of the outer part. The technical essence of the method for determining the normative value of the reactive load factor of the power supply system to a specific electricity consumer is disclosed, which guarantees the electromagnetic compatibility of the mentioned system is guaranteed and the economic essence of such method is determined.

**Key words:** real-mathematical modeling in electric power engineering, quantization of an electively elastic dielectric environment of a power supply system, electromagnetic field, main criterion of electromagnetic compatibility of electric power systems.

## МЕТОДИКА НОРМИРОВАНИЯ ГЛАВНОГО КРИТЕРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ И ПРИРАВНЕННЫМ К НИМ ПОТРЕБИТЕЛЯМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

А. И. Дорошенко, А. С. Пасько

Одесский национальный политехнический университет

**Аннотация.** Опираясь на современную квантовую физику, предлагается оригинальный подход к принципу электропередачи промышленным и приравненным к ним потребителям электроэнергии, которая считает ее электроустановкой, которая передает упомянутым потребителям электрическое напряжение, как потенциальную форму электромагнитной энергии. Раскрывается техническая сущность методики определения нормативного значения коэффициента реактивной нагрузки системы электроснабжения конкретному потребителю электроэнергии, при котором гарантированно соблюдает электромагнитная совместимость данной системы и определяется экономическая сущность такой методики.

**Ключевые слова:** реально-математическое моделирование в электроэнергетике, квантование электрически упругой диэлектрической среды системы электроснабжения, электромагнитное поле, главный критерий электромагнитной совместимости электроэнергетических систем.

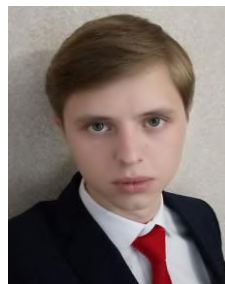
Отримано 29.08.2019р.



**Дорошенко Александр Иванович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электропоставки та енергетичного менеджменту Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: dai010438@gmail.com, tel. +38-067-762-95-89.

**Doroshenko Alexander**, candidate of technical Sciences, associate Professor, Professor of Department of electrical and energy management Odessa national Polytechnic University. Prosp. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, E-mail: dai010438@gmail.com, тел. +38-067-762-95-89.

**ORCID: 0000-0001-5540-7025**



**Пасько Артем Сергійович**, студент Одеського національного політехнічного університету, просп. Шевченко, 1, Одеса, Україна, e-mail: [skiper.art@gmail.com](mailto:skiper.art@gmail.com), тел. +38-050-926-25-69.

**Pasko Artem**, student of Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, e-mail: [skiper.art@gmail.com](mailto:skiper.art@gmail.com), tel. +38-050-926-25-69.

**ORCID: 0000-0001-6580-0066**