

**ПРО ФІЗИКУ І МАТЕМАТИКУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ПРОМИСЛОВИМ І ДОРІВНЕНИМ ДО НИХ
СПОЖИВАЧАМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

О. І. Дорошенко¹, С. О. Борисенко²

¹Одесский национальный политехнический университет

²ООО «Оделеко»

Анотація. Спираючись на сучасну квантову фізику, пропонується оригінальний підхід до принципу моделювання передавання електричної енергії промисловим і дорівненим до них її споживачам, яке здійснюється за умови того, що напруга струмоведучих частин електропередавання, як діючої електроустановки є потенційною формою електромагнітної енергії СЕП таким споживачам. Розроблено статичну векторно-квантову модель такого електропередавання, вважаючи головним критерієм її ефективності коефіцієнт реактивного навантаження такої конкретної СЕП.

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

Вступ

Безумовно те, що енергія є основою життя і діяльності сучасного людського загалу у всіх сферах його діяльності. При цьому, як стверджує сучасна наука, вона вважається формою руху матерії – універсального будівельного матеріалу з якого, за одним і тим же принципом побудовано усі об'єкти матеріального світу всієї Природи (живої і неживої), включно з Космосом), в його межах $\mp \infty$.

Очевидно, що як наука енергетика починається з того моменту, коли первісна людина обмірковано запалила в своїй печері багаття для приготування їжі та обігріву і почала регулювати його режим. Розвиток такої теплової енергетики призвів до появи інших її видів, у тому числі і електричної.

Дякуючи своїй мобільності і універсальності перетворення у інші види діючої енергії, електрична енергія (електроенергія) серед інших її видів, по праву, посідає перше місце. Тому вироблення, розподіл і передавання електроенергії окремим конкретним її споживачам виокремилось у окрему підгалузь економіки кожної країни, з будь-яким політичним і економічним устроєм – електроенергетику.

Електроенергетика виконує свою функцію за допомогою власної технологічної підсистеми – електроенергетичної системи (ЕЕС), яку можна вважати системою електропостачання загального призначення. Її призначення – безпечно, економічне і безперервне постачання конкретним споживачам електроенергії, встановленої на держав-

ному рівні якості (стандарт якості промислової продукції), [1].

У відповідності до нормативного документа [2], система електропостачання (СЕП) – сукупність джерела електроенергії і електричної мережі, яка приєднує до такого джерела приймальний пункт електроенергії (ПП) конкретного її споживача. Таким чином, електропостачання (як дія) є процесом електропередавання електроенергії конкретному її споживачу, яку здійснює діюча електроустановка. Можливу принципову електричну схему такої електроустановки представлено на рис. 1.

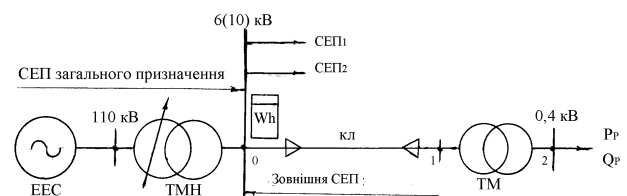


Рис. 1. Принципова схема електропередавання

До точки 0 цієї схеми діє ЕЕС (як СЕП загального призначення), а у точці 0 починається СЕП зовнішнього електропостачання конкретному її споживачу, приймальним пунктом якої є затискачі первинної обмотки трансформатора типу ТМ (точка 1 на рис.1), як точки ПП такої СЕП.

Очевидно, що точка 0 є точкою розподілу балансової приналежності електричних мереж ЕЕС і СЕП конкретному її споживачу, де доцільно улаштувати комерційний облік спожитої в СЕП електроенергії – Wh .

Як можна бачити, у точці 0 здійснюється регулювання напруги під навантаженням за допомогою спеціального пристрою силового трансформатора типу ТМН.

СЕП внутрішнього електропостачання діє в межах за точкою 2, де трансформатор ТМ у змозі регулювати свою вторинну напругу за допомогою спеціального пристрою ПБЗ без навантаження. Такий трансформатор є джерелом напруги системи внутрішнього електропостачання, де діють фізичні споживачі електроенергії (електроустановки) з номінальною напругою 0,4 кВ, які одержали назву електроприймачів.

Таким чином, електропостачання електроенергії її конкретному споживачу (фізичному або юридичному, як сукупності фізичних) полягає у передаванні йому напруги конкретного номінального рівня. Такі фізичні споживачі електроенергії (діючі електроустановки з номінальною напругою 0,4 кВ – електроприймачі) за допомогою власних електромагнітних полів перетворюють електричну енергію (напругу) у електромагнітну енергію, як таку, що може виконувати корисну роботу – крутить, світить або нагріває.

Спираючись на таку концепцію, в [3] було підтверджено тезу про те, що робочим інструментом будь-якої електроустановки являється електромагнітне поле, яке створюється одночасною дією напруги і струму провідності її струмоведучих частин в діелектричному середовищі, яке оточує згадані частини, під постійно діючим впливом магнітного поля Землі, як невід'ємної частини її поля гравітації. При цьому, електромагнітне поле СЕП є сукупністю полів усіх її електроприймачів.

Об'єктом дослідження даної роботи є електромагнітне поле електропередавання, як діючої електроустановки, яка за допомогою власного електромагнітного поля передає напругу (потенційну форму електромагнітної енергії) від СЕП загального призначення (ЕЕС) конкретному споживачу (електроприймачу) електроенергії.

Мета дослідження – спираючись на сучасну квантову фізику (наприклад, роботи [4] та [5]), розробити статичну векторно-квантову модель електропередавання (передавання енергії) конкретному фізичному або юридичному споживачу.

Результати дослідження

Як відомо з [1], напруга джерела живлення СЕП конкретному фізичному споживачу електроенергії має регулюватись в межах

$$U_2 \pm 0,05 \cdot U_{НОМ}, \text{ кВ} \quad (1)$$

де $U_{НОМ} = 0,4 \text{ кВ}$ – номінальна вторинна напруга трансформатора – джерела електроенергії електропередавання СЕП внутрішнього електропостачання конкретному споживачу електроенергії, як діючої електроустановки, кВ.

На рис.1 можна бачити, що до точки 1 це напруга зовнішнього електропостачання 6(10) кВ, де її регулювання відбувається за допомогою пристрою РПН (регулювання під навантаженням), рис. 2.

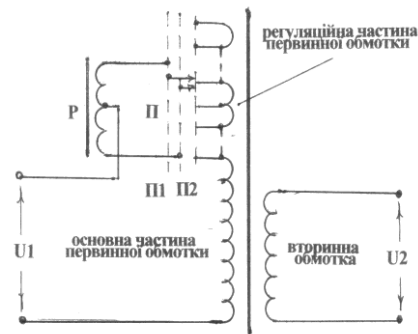


Рис. 2. Принципова схема обмоток трансформатора типу ТМН з РПН

За точкою 2 схеми рис.1 починається система внутрішнього електропередавання, де діє номінальна напруга $U_{НОМ2} = 0,4 \text{ кВ}$. При цьому, у якості ПП такої СЕП слугують затискачі первинної обмотки знижувального трансформатора типу ТМ- 6(10)/0,4 кВ, як джерела її електроенергії, рис. 3.

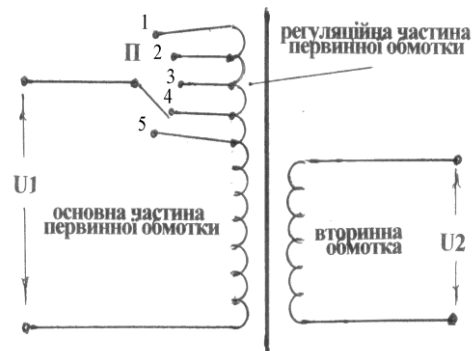


Рис. 3. Принципова схема обмоток трансформатора типу ТМ з ПБЗ

Такий трансформатор у змозі регулювати свою вторинну напругу перемиканням числа витків первинної обмотки в межах $\pm 2 \times 2,5\%$ $U_{НОМ1}$ без його збудження (ПБЗ) – у відімкненому стані,

При цьому, залежно від положення перемикача П, трансформатор змінює коефіцієнт трансформації у залежності від номінальних значень таблиці 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти трансформації ПБЗ

$P_{№}$, од.	K_{TP} , в.о.
1	15,750
2	15,375
3	15,000
4	14,625
5	14,250

Тобто, мінімальне значення напруги U_1 точки 1 (рис.1) в режимі максимального навантаження споживача не може бути меншим ніж $U_1 = 0,95 \cdot U_{НОМ}$, кВ, а відхилення напруги цієї точки СЕП будь-якого рівня електропостачання від його номінального значення має бути в межах

$$1,05 \cdot U_{НОМ} \geq U_1 \geq 0,95 \cdot U_{НОМ}. \quad (2)$$

Таким чином, відхилення напруги можна вважати головним фізичним критерієм електромагнітної сумісності системи, за якого така система може виконувати згадану раніше, триєдину задачу електроенергетики. При цьому ліву частину співвідношення (2) мають дотримувати електричні мережі постачальників напруги, а праву – її споживачі.

Енергопостачальні організації (ЕО) мають здійснювати контроль за електричним навантаженням споживачів за допомогою нормативного значення напруги ПП в їх СЕП і застосовувати штрафні санкції у разі не дотримання такого нормативу.

Визначення розрахункового (максимального) навантаження конкретного споживача електроенергії проводиться за нормативним документом [6], який спирається на Закон України «Про електроенергетику», Правила користування електричною енергією та Положення про державний енергетичний нагляд за режимами споживання електричної і теплової енергії.

Виміри проводяться в години ранкового (з 10⁰⁰ до 13⁰⁰) та вечірнього (за його наявності, з 18⁰⁰ до 21⁰⁰) за допомогою послідовної фіксації показань засобів витоку активної і реактивної енергії, табл. 2.

Таблиця 2

Години виміру	
10 ⁰⁰ - 10 ³⁰	18 ⁰⁰ - 18 ³⁰
10 ³⁰ - 11 ⁰⁰	18 ³⁰ - 19 ⁰⁰
11 ⁰⁰ - 11 ³⁰	19 ⁰⁰ - 19 ³⁰
11 ³⁰ - 12 ⁰⁰	19 ³⁰ - 20 ⁰⁰
12 ⁰⁰ - 12 ³⁰	20 ⁰⁰ - 20 ³⁰
12 ³⁰ - 13 ⁰⁰	20 ³⁰ - 21 ⁰⁰

З шести таких значень вибирають максимальне значення електроенергії:

Активної – $W_{PМАХ}$, кВт·г.

Реактивної – $W_{QМАХ}$, квар·г.

При цьому, розрахункову потужність визначають за формулами:

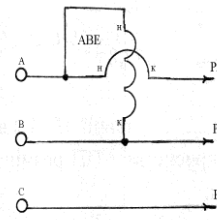
Активної, кВт

$$P_P = \frac{W_{PМАХ}}{0,5}. \quad (3)$$

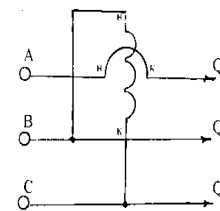
Реактивної, квар

$$Q_D = \frac{W_{QМАХ}}{0,5}. \quad (4)$$

Зважаючи на схему вмикання вимірювальних обмоток лічильників (рис. 4), формули (3) та (4) визначають діюче значення розрахункового навантаження споживача.



а – активної електроенергії



а – реактивної електроенергії

Рис. 4. Схеми вмикання обмоток лічильників

За рекомендацією [7], при математичному моделюванні будь-якого фізичного процесу необхідно пам'ятати: «...Математическая постановка технической задачи является самой сложной и важной частью работы. Важны не столько выбираемые математические методы расчета, сколько выбранные упрощения первоначальной, подлежащей решению физической задачи...».

Очевидно, що у якості фізичного спрощення трансформаторного електропередавання має бути вибраною заступна схема СЕП, яка є своєрідним містком для переходу від фізики роботи електропередавання до його математики і навпаки – від математики до фізики, рис. 5.

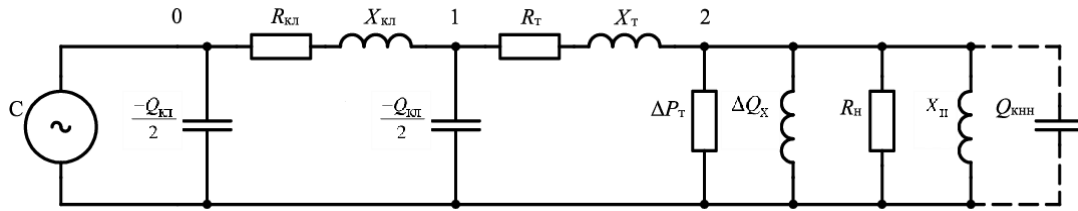


Рис.5. Заступна схема конкретної СЕП

Як відомо, параметри заступної схеми внутрішнього електропостачання є активний і реактивний опори та втрати активної і реактивної потужності трансформатора, які визначаються приведеними до вторинної напруги з урахуванням його паспортних параметрів, за відомими формулами:

Активний опір трансформатора, Ом

$$R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_2^2}{S_{НОМ}^2} \cdot 10^3, \quad (5)$$

де ΔP_K - активні втрати короткого замикання, кВт; U_2 - вторинна номінальна напруга $U_{НОМ} = 0,4$ кВ; $S_{НОМ}$ - номінальна потужність трансформатора, кВА.

Реактивний опір трансформатора, Ом

$$X_T = \frac{U_K \cdot U_2^2}{S_{НОМ}} \cdot 10, \quad (6)$$

де U_K - напруга короткого замикання, %.

Активні втрати трансформатора, кВт

$$\Delta P_T = dpx + \Delta P_K \cdot \beta_T^2, \quad (7)$$

де dpx - активні втрати неробочого ходу трансформатора, кВт; β_T - коефіцієнт навантаження трансформатора, який визначається відомою формулою, в.о.

$$\beta_T = \frac{\sqrt{P_P^2 + Q_D^2}}{S_{НОМ}}; \quad (8)$$

P_P - розрахункове активне навантаження, визначене за формулою (3), кВт; Q_D - діюче значення реактивного навантаження, визначене за формулою (4), квар.

Реактивні втрати трансформатора (діюче значення), квар

$$\Delta Q_T = dqx + \Delta Q_K \cdot \beta_T^2, \quad (9)$$

де dqx - реактивні втрати неробочого ходу трансформатора, які можна визначити за формулою, квар

$$dqx = \sqrt{\left(\frac{Ix \cdot S_{НОМ}}{100}\right)^2 - dpx^2}; \quad (10)$$

ΔQ_K - реактивні втрати короткого замикання трансформатора, які можна визначити за формулою, квар

$$\Delta Q_K = \Delta P_K \cdot \frac{X_T}{R_T} = a \cdot \Delta P_K, \quad (11)$$

де a - характеристичний коефіцієнт трансформатора, як частини електропередавання, в.о.

$$a = \frac{X_T}{R_T}. \quad (12)$$

Втрати напруги в трансформаторі його робочого режиму можна визначити формулою, В

$$\Delta U_T = ((P_P + \Delta P_T) \cdot R_T + (Q_D + \Delta Q_T) \cdot X_T) / U_2, \quad (13)$$

де U_2 - вторинна напруга трансформатора, кВ.

Заступна схема зовнішнього електропостачання характеризується такими параметрами:

Активний опір лінії електропередавання (кабельної або повітряної), Ом

$$R_{Л} = r_0 \cdot L_{Л}, \quad (14)$$

де r_0 - питомий погінний активний опір лінії, Ом/км; $L_{Л}$ - довжина лінії, км.

Реактивний опір лінії електропередавання (кабельної або повітряної), Ом

$$X_{Л} = x_0 \cdot L_{Л}, \quad (15)$$

де x_0 - питомий погінний реактивний опір лінії, Ом/км.

Власна реактивна потужність лінії електропередавання смісного характеру, яка вважається рівномірно розподілена за довжиною лінії і тому, умовно, поділена на дві однакові частини, квар

$$Q_{ВЛ} = \frac{-q_0 \cdot L_{Л}}{2}, \quad (16)$$

де q_0 - погінна власна реактивна потужність емнісного характеру, квар/км.

Числові значення r_0 та q_0 , залежно від матеріалу і перерізу проводу лінії наведено у довідковій літературі (наприклад, [8]).

Розрахункове навантаження СЕП, визначене за методикою [6] і формулами (3) та (4) представлено в заступній схемі електропередавання опорами:

Активним – R_H , Ом.

Реактивним – X_H , Ом. ,

Таким чином, втрати напруги в трансформаторі при електропередаванні залежить від коефіцієнта його навантаження і від співвідношення між його реактивною і активною потужністю такого навантаження, яке в [9] і [10] було визнано у якості головного критерія електромагнітної сумісності СЕП, що живиться напругою від такого трансформатора.

Спираючись на класичну фізику і на теорему Пойтинга, в роботі [11] було запропоновано реально-математичну модель електропередавання, сутність якої пояснює формула (17), яка визначає повну потужність електромагнітного поля вектором Пойтинга \vec{P} , кВА

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}, \quad (17)$$

де \vec{E} – вектор напруженості електричного поля, як частини загального електромагнітного поля СЕП, кВ/м; \vec{H} – вектор напруженості магнітного поля, як частини загального електромагнітного поля СЕП, А/м.

Вважаючи, що

$$\vec{E} \equiv \vec{U} \quad \text{та} \quad \vec{H} \equiv \vec{I}$$

рівняння (17) можна представити у вигляді

$$\begin{aligned} s &= u \cdot i = U_m \cdot \sin \alpha t \times I_m \cdot \sin(\alpha t - \varphi) = \\ &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \alpha t \times \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\alpha t - \varphi) = \\ &= 2 \cdot U \cdot I \cdot \sin \alpha t \cdot \sin(\alpha t - \varphi) = \\ &= U \cdot I \cdot (\cos \varphi - \cos(2\alpha t - \varphi)) = \\ &= U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\alpha t - \varphi), \quad (18) \end{aligned}$$

де U_m – амплітудне значення синусоїдальної напруг, кВ; I_m – амплітудне значення синусоїдального струму провідності, А; U – діюче значення синусоїдальної напруги, кВ; I – діюче значення синусоїдального струму провідності, А;

φ – кут зсуву фаз миттєвих значень синусоїдальних напруги і струму провідності струмоведучих частин ЕЕС, град.

При цьому, логіка суми дії векторів такого рівняння змінюється з логіки «і» на логіку «або».

Таким чином, з'являється математична можливість для визначення величини повної потужності системи через значення напруги її струмоведучих частин і струму навантаження за формулою, кВА

$$s = s1 + s2, \quad (19)$$

де $s1$ - перша складова рівняння (18), кВА

$$s1 = U \cdot I \cdot \cos \varphi; \quad (20)$$

$s2$ - друга складова рівняння (18), кВА

$$s2 = U \cdot I \cdot \cos(2 \cdot \alpha t - \varphi), \quad (21)$$

Першу складову формула (20) вважають поздовжньою складовою (за напрямком електропередавання) енергії електромагнітного поля ЕЕС, позначають літерою P і називають активною електроенергією, кВт

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (22)$$

Другу складову згаданого рівняння вважають поперечною складовою (за напрямком електропередавання) енергії згаданого поля ЕЕС, позначають літерою Q і називають реактивною електроенергією, квар.

$$Q = U \cdot I \cdot \cos(2\alpha t - \varphi). \quad (23)$$

Як можна бачити, повна потужність електромагнітного поля СЕП будь-якого споживача електроенергії, фізично, має бути хвилею потужності поляризації електрично пружного діелектричного середовища системи, яка біжить від джерела її живлення (точка 0 на рис. 1) до ПП енергії споживача (точка 2 на рис.1). При цьому, знак фазового кута φ впливає на початок створення цієї хвилі і її характер.

Таким чином, перша складова рівняння (18) репрезентує кулонівську силу в безвихровому електричному полі, і тому, її можна розглядати як потенціальну енергію електромагнітного поля, а другу – як кінетичну енергію цього поля, яка створюється силами Кариоліса.

Вважаючи на різний характер сил, встановлених рівнянням (18), які створюють загальне електромагнітне поле СЕП, амплітудне значення повної потужності такого поля визначається відомою формулою, кВА

$$S_p = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (24)$$

де S_p – має бути амплітудним значенням згаданої хвилі енергії СЕП, кВА.

Як можна бачити, енергія електромагнітного поля електроприймача має дві складові: поздовжню (відносно напрямку електропередавання, як дії, формула (20)), яку називають активною електроенергією; поперечну (відносно згаданого напрямку, формула (21)), яку називають реактивною електроенергією. При цьому вважається, обидві вони створюються генераторами ЕЕС і передаються споживачам за допомогою її власних електричних мереж і мереж конкретних споживачів такої комплексної електроенергії, яку називають повною і визначають формулою, кВА

$$S = P \mp J \cdot Q, \quad (25)$$

де P – активна складова повної потужності (енергії електропередавання), кВт; Q – реактивна складова повної потужності (електроенергії електропередавання), квар; J – вектор, що вказує напрямком електропередавання реактивної потужності (енергії): знак плюс – від ЕЕС до споживача, а знак мінус – від споживача до ЕЕС.

Таким чином, цілком зрозуміло, що математика формули (18) не має ніякого фізичного обґрунтування.

Створення електромагнітного поля електропередавання, як діючої електроустановки, сучасна квантова фізика пояснює процесом квантування електрично пружного (за даними [12]) діелектричного середовища, яке оточує струмоведучі частини електропередавання. При цьому, в [4] та [5] квантуванням вважається процес створення кругового електромагнітного поля молекул такого середовища одночасною дією на нього напруги і струму провідності електропередавання в умовах постійно діючого магнітного поля Землі, як обов'язкової складової її поля гравітації, рис. 6.

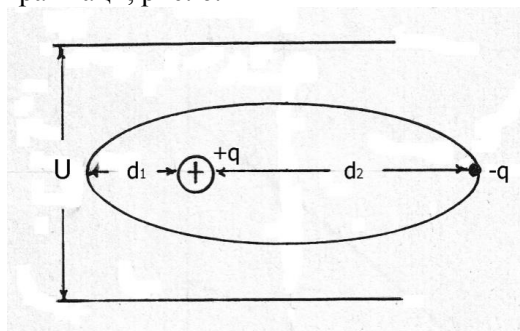


Рис. 6. Можливий вигляд квантона

Спираючись на принцип суперпозиції, діелектричне середовище електропередавання, як діючої електроустановки, загальне її електромагнітне поле представляється у вигляді сукупного квантона, математика якого спирається на за-

гальну фізику квантування окремих молекул такого середовища

Зважаючи на те, що струм провідності струмоведучих частин створюється дією їх напруги, такий квантон можна замінити одночасною дією двох умовних квантонів:

Квантон напруги – одночасно діють на діелектричне середовище напруга і магнітне поле Землі, рис. 7

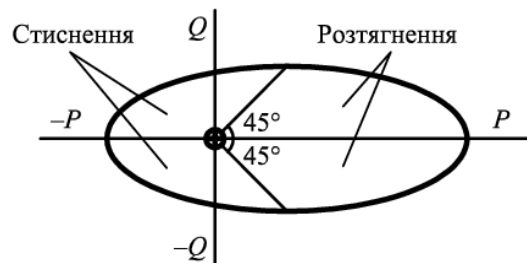


Рис. 7. Утворення квантона напруги

Як можна бачити, при цьому, діелектричне середовище електропередавання розтягується у поздовжньому напрямку електропередавання і працює як пружина у розтягнутому стані, коли енергія споживається (передається її споживачу), що може бути математичним аналогом активної електроенергії.

Квантон струму – одночасно діють на діелектричне середовище струм провідності електропередавання і магнітне поле Землі, рис. 8.

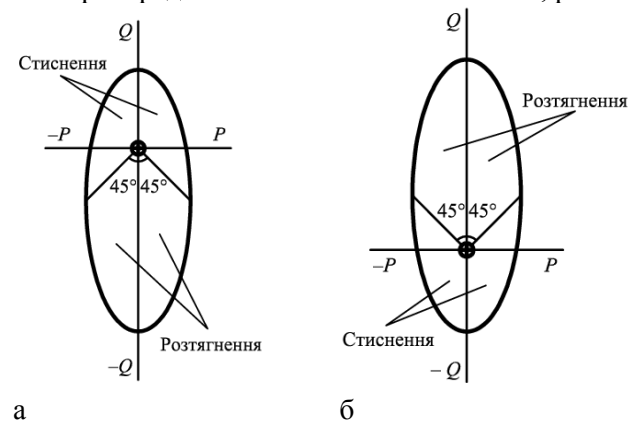


Рис. 8. Утворення квантона струму провідності:

а – струм відстає від напруги;
б – струм випереджає напругу

Як можна бачити, напрямком такого розтягнення залежить від кута зсуву фаз синусоїдально змінних напруги і струму провідності електропередавання, як діючої електроустановки.

Зважаючи на заступну схему електропередавання (рис. 5) можна стверджувати, що для виконання свого призначення мають працювати одночасно два його проводи – прямий і зворотній. Прямий той, що приєднується до позитивного затискача джерела напруги, рис. 9.

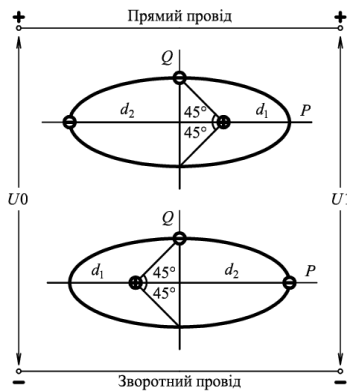


Рис. 9. Фізика математичної дії квантування

При цьому, у трифазному електропереда-

ванні працюють одночасно усі три провідники фаз, виконуючи роль прямого (одна фаза) і зворотнього (дві інші фази), послідовно, тричі протягом зміни напруги за синусоїдальним характером (через кожні 60 градусів).

Таким чином, загальний квантон електропередавання має коливатися за синусоїдальним характером у нижній його частині, якщо струм провідності струмоведучих частин електропередавання відстає від їх напруги і у верхній частині – якщо такий струм випереджає напругу. Такий робочий процес електропередавання представлено на рис. 10.

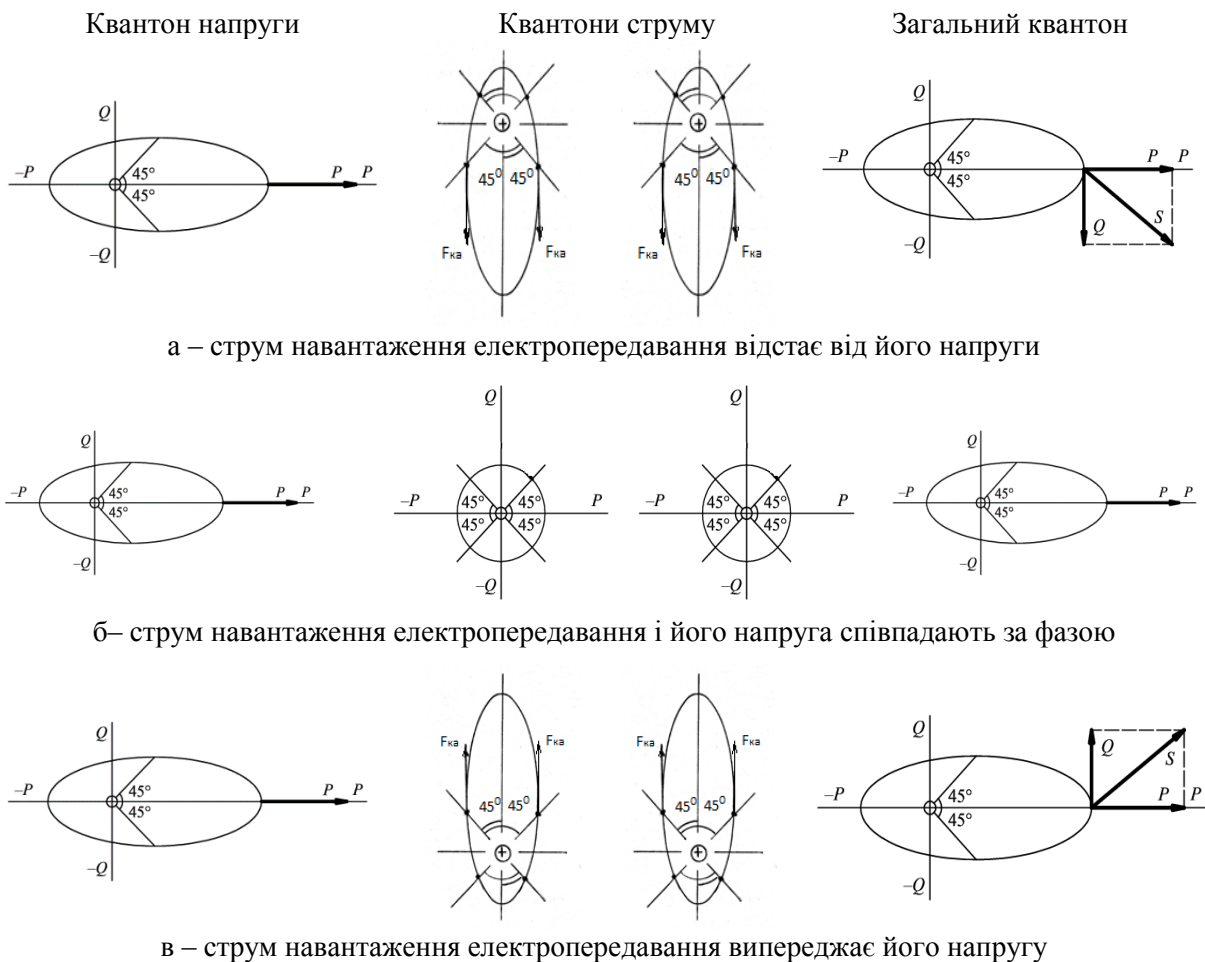
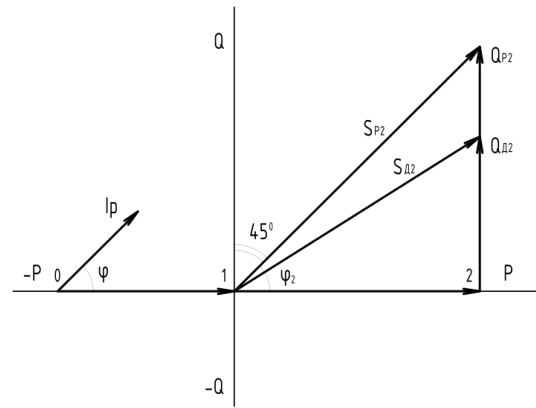
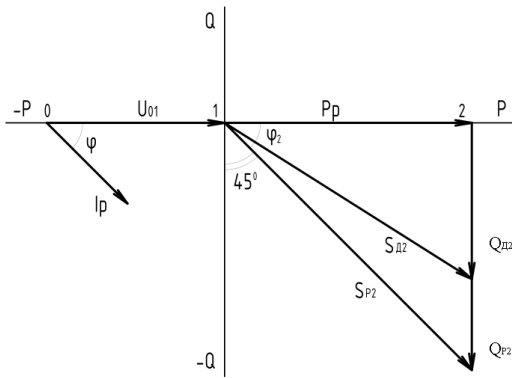


Рис. 10. Сукупна дія умовних квантонів електропередавання

Як можна бачити, у поздовжньому напрямку загального квантона працює прямий провід електропередавання, який передає напругу до ПП СЕП конкретному споживачу електроенергії. У поперечному працюють два зворотні проводи, які двічі кожного пів періоду зміни напруги розтягують квантон у поперечному напрямку (чотириразово протягом періоду її синусоїдаль-

ної зміни), а напрямок такого розтягнення залежить від кута зсуву такого синусоїдально змінного струму від згаданої напруги. Спираючись на фізику такого квантування, можна рекомендувати до запровадження при математичному аналізі роботи електропередавання статичну векторно-квантову модель його дії, яку представлено на рис. 11



а – струм провідності відстає від напруги

б – струм провідності випереджає напругу

Рис.11. Статична векторно-квантова модель електропередавання.

Оскільки, фізично, електроенергія передається споживачам у вигляді напруги і струм рівняння (18) визначається її величиною і властивостями діелектричного середовища електропередавання (як діючої електроустановки), то її величину ПП конкретної СЕП необхідно визначати з урахуванням схеми її заміщення. При цьому, втрати напруги електропередавання визначаються відомою формулою, кВ

$$\Delta U = \frac{P_P \cdot R_L + (Q_D - Q_{ВЛ} / 2) \cdot X_L}{U_{НОМ}} \cdot 10^{-3}, \quad (23)$$

де P_P - розрахункове активне навантаження електропередавання, кВт; R_L - активний опір електропередавання, який визначається формулою (14), Ом; Q_D - діюче значення реактивного навантаження електропередавання, квар; $Q_{ВЛ}$ - діюче значення власного реактивного навантаження електропередавання, визначене за формулою (16), квар; X_L - реактивний опір електропередавання, який визначається формулою (15), Ом.

Рівняння (23) можна представити у вигляді

$$\Delta U = \frac{P_P \cdot R_L}{U_{НОМ}} \cdot 10^{-3} + \frac{(Q_D - Q_{ВЛ} / 2) \cdot X_L}{U_{НОМ}} \cdot 10^{-3} = \Delta U_P + \Delta U_Q, \quad (24)$$

де ΔU_P - втрати напруги електропередавання тільки від його активного навантаження, кВ; ΔU_Q - втрати напруги електропередавання тільки від його реактивного навантаження, кВ.

Приймаючи за умовну одиницю значення ΔU_P , рівняння (24) можна представити в умовних одиницях у вигляді, в.о.

$$\begin{aligned} \Delta U^* &= \frac{\Delta U_P}{\Delta U_P} + \frac{\Delta U_Q}{\Delta U_P} = 1 + \left(\frac{Q_D}{P_P} - \frac{Q_{ВЛ} / 2}{P_P} \right) \cdot \frac{X_L}{R_L} = \\ &= 1 + a \cdot (tg\varphi_{D1} - tg\varphi_E), \end{aligned} \quad (25)$$

де $tg\varphi_{D1}$ - діюче значення коефіцієнта реактивного навантаження СЕП споживача електроенергії у точці 1 (рис.5)

$$tg\varphi_{D1} = \frac{Q_{D1}}{P_{D1}}, \text{ в.о.}; \quad (26)$$

a - характеристичний коефіцієнт електричної мережі електропередавання, який визначається відомою формулою

$$a = \frac{X_L}{R_L}, \text{ в.о.}; \quad (27)$$

$tg\varphi_E$ - діюче значення коефіцієнта власного реактивного навантаження електропередавання, яке можна визначити за формулою, в.о.

$$\begin{aligned} tg\varphi_E &= \frac{\Delta Q_{EQ}}{\Delta P_{EQ}} = \frac{Q_{ВЛ} \cdot X_L \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot Q_E \cdot R_L \cdot 10^{-3}} = \\ &= \frac{X_L}{R_L} = a, \text{ в.о.} \end{aligned} \quad (28)$$

Таким чином, рівняння (25) набуває вигляду, в.о.

$$\Delta U^* = 1 - (tg\varphi_{D1} - a) \cdot a. \quad (29)$$

Спиряючись на таке співвідношення, напругу ПП СЕП можна визначити за формулою, в.о.

$$U_1 = \cos\varphi_1 - a \cdot tg\varphi_H + a^2, \quad (30)$$

Таблиця 4

де $\cos\varphi_1$ - значення коефіцієнта активного навантаження споживача, яке відповідає значенню $tg\varphi_H$, в.о.

$$\cos\varphi_1 = \cos(\arctg(tg\varphi_H)); \quad (31)$$

$tg\varphi_H$ - нормативне значення коефіцієнта реактивного навантаження СЕП конкретному споживачу електроенергії, яке встановлює і контролює ЕО, в.о.

Зважаючи на фізику дії ПБЗ трансформатора ТМ, мінімальне значення первинної напруги, як мінімальне значення напруги ПП СЕП конкретному споживачу електроенергії в режимі її максимального навантаження має бути, кВ

$$U_1 = 0,9456 \cdot U_{НОМ}. \quad (32)$$

При цьому,

$$tg\varphi_H = tg\varphi(\arccos(0,9456)) = 0,3440, \text{ в.о.}$$

Зважаючи на формулу (30), числове (діюче) значення нормативного коефіцієнта реактивного навантаження конкретної СЕП має визначатися за співвідношенням

$$tg\varphi_{HD} = (0,3440 - a^2 / 2) / \sqrt{2}, \text{ в.о.} \quad (33)$$

Числові значення такого коефіцієнта для напруги електропередавання $U_{НОМ} = 6$ кВ, обчислені за формулою (33) наведено в табл.3, а при $U_{НОМ} = 6$ кВ = в табл. 4

Таблиця 3

Числові значення $tg\varphi_H$, в.о. при $U_{НОМ} = 6$ кВ

КЛ	алюміній		мідь	
	a , в.о.	$tg\varphi_{HD}$, в.о.	a , в.о.	$tg\varphi_{HD}$, в.о.
10	0,0355	0,2428	0,0355	0,2428
16	0,0526	0,2423	0,0526	0,2423
25	0,0734	0,2413	0,0734	0,2413
35	0,0977	0,2399	0,0977	0,2399
50	0,1339	0,2369	0,1339	0,2369
70	0,1806	0,2317	0,1806	0,2317
95	0,2393	0,2230	0,2393	0,2230
120	0,2946	0,2126	0,2946	0,2126
150	0,3592	0,1976	0,3592	0,1976
185	0,4371	0,1757	0,4371	0,1757
240	0,5504	0,1361	0,5504	0,1361

Числові значення $tg\varphi_H$, в.о. при $U_{НОМ} = 10$ кВ

КЛ	алюміній		мідь	
	a , в.о.	$tg\varphi_{HD}$, в.о.	$F_{КЛ}$, мм ²	a , в.о.
16	0,0582	0,2408	0,0983	0,2364
25	0,0798	0,2387	0,1338	0,2306
35	0,1067	0,2352	0,1827	0,2196
50	0,1452	0,2283	0,232	0,2014
70	0,1941	0,2166	0,3308	0,1659
95	0,2546	0,1974	0,4278	0,1138
120	0,3140	0,1735	0,5294	0,0451
150	0,3835	0,1392	0,6475	-0,0532
185	0,4611	0,0929	0,7778	-0,1845
240	0,5814	0,0042	0,9740	-0,4276

Як було рекомендовано в [10], збиток споживача від порушення такого нормування коефіцієнта реактивного навантаження конкретної СЕП можна визначити за допомогою коефіцієнта

$$K_{\Delta PQ} = \frac{tg\varphi_{D1}^2 - tg\varphi_{HD}^2}{1 + tg\varphi_{D1}^2}, \quad (34)$$

де $tg\varphi_{D1}$ - діюче значення коефіцієнта реактивного навантаження споживача у минулому розрахунковому періоді роботи (календарний місяць), який визначається відомою формулою

$$tg\varphi_{D1} = \frac{WQ}{WP}, \quad (35)$$

де WQ - виток реактивної енергії, зафіксований її комерційним обліком, квар·год./міс.; WP - виток активної електроенергії, зафіксований її комерційним обліком, кВт·год./міс.

При цьому, збиток споживача від наднормового його реактивного навантаження у розрахунковому періоді складає величину

$$Ce_{\Delta Q} = K_{\Delta PQ} \cdot CeP, \quad (36)$$

де CeP - вартість спожитої у розрахунковому періоді активної електроенергії за її комерційною ціною, грн./міс.

Оскільки надлишкове навантаження конкретної СЕП збільшує струм навантаження електричних мереж ЕО, то він збільшує витрати таких організацій на обслуговування і ремонт своїх власних мереж і зменшує їх пропускну спроможність, які мають бути компенсовані за рахунок споживача активної електроенергії.

За аналогією з формулою (34), можна визна-

чити коефіцієнт такого збитку, написавши, в.о.

$$K_{\Delta S} = \frac{\sqrt{1 + tg\varphi_{Д1}^2} - \sqrt{1 + tg\varphi_{НД}^2}}{\sqrt{1 + tg\varphi_{Д1}^2}}. \quad (37)$$

Вартість такого збитку для конкретного споживача електроенергії пропонується визначати за формулою, грн./міс

$$Ce_{\Delta S} = k_{PO} \cdot K_{\Delta S} \cdot Ce_{\Delta Q}, \quad (38)$$

де k_{PO} - коефіцієнт щорічних відрахувань від вартості електричних мереж ЕЕС на ремонт і обслуговування, який за даними [8], можна прийняти, у середньому, на рівні 0,03 в.о.

При цьому, загальний збиток споживача складає величину, грн./міс

$$CeQ = (K_{\Delta PQ} + 0,033 \cdot K_{\Delta S}) \cdot CeP. \quad (39)$$

Таким чином електромагнітна сумісність СЕП конкретному споживачу електроенергії набуває економічної оцінки.

Практичне застосування методики, що пропонує дана робота, може бути розглянуто у наступному прикладі.

Споживач електроенергії (як юридична особа) промисловим способом ремонтує комунально-побутову техніку. Принципову схему постачання йому електроенергії представлено на рис.1.

Точка 0 цієї схеми є джерелом живлення споживача, а точка 1 – приймальним пунктом (ПП) напруги (як потенційної форми електроенергії).

Як можна бачити, це затискачі первинної обмотки знижувального трансформатора типу $TM - 630/6$, де здійснюється регулювання його вторинної напруги $U_{НОМ2} = 0,4$ кВ за допомогою перемикачів числа витків первинної обмотки без її збудження (ПБЗ).

За даними довідкової літератури, він має наступні параметри:

Активні втрати неробочого режиму

$$\Delta P_X = 1,310 \text{ кВт.}$$

Активні втрати короткого замикання

$$\Delta P_K = 7,600 \text{ кВт.}$$

Реактивні втрати неробочого режиму

$$\Delta Q_{ХД} = 13,332 \text{ квар.}$$

Реактивні втрати короткого замикання

$$\Delta Q_{КД} = 24,270 \text{ квар}$$

Опори трансформатора, приведені до його вторинної напруги

Активний – $R_T = 0,0031$ Ом.

Реактивний – $X_T = 0,0140$ Ом.

Електропередавання здійснюється за допомогою кабельної лінії з алюмінієвими жилами типу ААБ-6-3х35 довжиною $L_{КЛ} = 2,5$ км при номінальній напрузі $U_{НОМ2} = 6$ кВ, який (за даними [8]) має наступні питомі параметри:

Активний опір – $r_0 = 0,890$ Ом/км.

Реактивний опір – $x_0 = 0,087$ Ом/км.

Ємнісна потужність – $q_0 = -4,6$ квар/км.

При цьому, він характеризується наступними параметрами:

Активний опір

$$R_{КЛ} = r_0 \cdot L_{КЛ} = 0,890 \cdot 2,5 = 2,2250 \text{ Ом.}$$

Реактивний опір

$$X_{КЛ} = x_0 \cdot L_{КЛ} = 0,087 \cdot 2,5 = 0,2175 \text{ Ом.}$$

Характеристичний коефіцієнт електропередавання, як однорідної мережі

$$a = \frac{X_{КЛ}}{R_{КЛ}} = \frac{x_0}{r_0} = \frac{0,087}{0,890} = 0,0977 \text{ в.о.}$$

Діюче значення реактивної трифазної власної потужності

$$Q_{ДКЛ} = -\frac{q_0 \cdot L_{КЛ}}{\sqrt{2}} = -\frac{4,6 \cdot 2,5}{\sqrt{2}} = -8,132 \text{ квар.}$$

Джерело живлення (точка 0 схеми рис. 1) – трансформатор системної підстанції типу ТМН, де здійснюється регулювання його вторинної напруги $U_{НОМ2} = 6,3$ кВ під навантаженням (без його відмикання) – діє РПН:

В режимі максимуму навантаження ЕЕС – $U_2 = 6,3$ кВ.

В режимі мінімального навантаження ЕЕС – $U_2 = 6,0$ кВ.

Навантаження і напруга характерних точок СЕП, виміряні за діючою методикою [6], представлено в табл. 5 та 6.

Таблиця 5

Навантаження у точці 0

Параметр/режим	Максимум	Мінімум
P_{P0} , кВт	470,000	42,000
Q_{D0} , квар	510,000	50,000
U_0 , кВ	6,3	6,0

Таблиця 6

Навантаження у точці 2

Параметр/режим	Максимум	Мінімум
P_{P2} , кВт	440,000	40,000
Q_{D2} , квар	500,000	50,000
U_2 , В	6,3	6,0

Розрахунок робочих режимів СЕП:

Точка 0.

Режим мінімального навантаження СЕП в режимі мінімального навантаження ЕЕС

Повне діюче навантаження

$$S_{D0} = \sqrt{P_{P0}^2 + Q_{D01}^2} =$$

$$= \sqrt{42,0^2 + 50,0^2} = 65,299 \text{ кВА.}$$

Розрахунковий струм навантаження

$$I_{P0} = \frac{S_{D0}}{\sqrt{3} \cdot U_0} = \frac{65,299}{\sqrt{3} \cdot 6,0} = 6,3 \text{ А.}$$

Коефіцієнт реактивного навантаження

$$\operatorname{tg} \varphi_{D0} = \frac{Q_{D0}}{P_{P0}} = \frac{50,0}{42,0} = 1,1905 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт активного навантаження

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{P0}}{S_{D0}} = \frac{42,0}{65,299} = 0,6432 \text{ в.о.}$$

Активні втрати кабельної лінії

$$\Delta P_{KLO} = 3 \cdot I_{KLO}^2 \cdot R_{KL} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 3 \cdot 6,3^2 \cdot 2,2250 \cdot 10^{-3} = 0,265 \text{ кВт.}$$

Діюче значення реактивних втрат кабельної лінії

$$\Delta Q_{KLO} = (3 \cdot I_{P0}^2 \cdot X_{KL} \cdot 10^{-3} - Q_{KL} / 2) / \sqrt{2} =$$

$$= (3 \cdot 6,3^2 \cdot 0,2175 \cdot 10^{-3} - 8,132 / 2) / \sqrt{2} =$$

$$= -2,857 \text{ квар.}$$

Втрати напруги кабельної лінії

$$\Delta U_{KLO} = \sqrt{3} \cdot I_{P0} \cdot (R_{KL} + X_{KL}) \cdot 10^{-3} =$$

$$= \sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot (2,2250 + 0,2175) \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0,027 \text{ кВ.}$$

Напруга точки 1

$$U_{10} = U_0 - \Delta U_{KLO} = 6,0 - 0,027 = 5,973 \text{ кВ.}$$

З табл. 1 вибирається положення перемикача $\Pi_{01} = 1$, якому відповідає коефіцієнт трансформації $K_{T01} = 15,750$ в.о. При цьому, вторинна напруга трансформатора СЕП становить величину

$$U_{20} = U_{10} \cdot 10^3 / K_{T0} =$$

$$= 5,973 \cdot 10^3 / 15,750 = 379,2 \text{ В.}$$

Оскільки $U_{20} < 380,0$ В, то трансформатор ТМ має працювати з ПБЗ в положенні перемикача $\Pi_{01} = 2$, за якого $K_T = 15,375$ в.о.

Режим максимального навантаження СЕП без компенсації власного реактивного навантаження:

Розрахункова точка 0.

Повне діюче навантаження споживача

$$S_{D01} = \sqrt{P_{P01}^2 + Q_{D01}^2} =$$

$$= \sqrt{470,0^2 + 510,0^2} = 693,542 \text{ кВА.}$$

Розрахунковий струм навантаження СЕП

$$I_{P01} = \frac{S_{D01}}{\sqrt{3} \cdot U_{01}} = \frac{693,542}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 63,6 \text{ А.}$$

Коефіцієнт реактивного навантаження

$$\operatorname{tg} \varphi_{D01} = \frac{Q_{D01}}{P_{P01}} = \frac{510,0}{470,0} = 1,0851 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт активного навантаження

$$\cos \varphi_{01} = \frac{P_{P01}}{S_{D01}} = \frac{470,000}{693,542} = 0,6777 \text{ в.о.}$$

Втрати напруги кабельної лінії

$$\Delta U_{KLO1} = \sqrt{3} \cdot I_{P01} \cdot (R_{KL} + X_{KL}) \cdot 10^{-3} =$$

$$= \sqrt{3} \cdot 63,6 \cdot (2,2250 + 0,2175) \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0,269 \text{ кВ.}$$

Напруга точки 1

$$U_{11} = U_{01} - \Delta U_{KLO1} = 6,3 - 0,269 = 6,031 \text{ кВ.}$$

При цьому, вторинна напруга трансформатора СЕП становить величину

$$U_{20} = U_{10} \cdot 10^3 / K_{T0} =$$

$$= 6,031 \cdot 10^3 / 15,375 = 392,3 \text{ В.}$$

Розрахункова точка 2.

Повне діюче навантаження споживача без компенсації її реактивного навантаження

$$S_{D20} = \sqrt{P_{P20}^2 + Q_{D20}^2} =$$

$$= \sqrt{440,0^2 + 500,0^2} = 666,033 \text{ кВА.}$$

Коефіцієнт навантаження трансформатора

$$\beta_{T0} = \frac{S_{D20}}{S_{НОМ}} = \frac{666,033}{630} = 1,057 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт активного навантаження СЕП

$$\cos \varphi_{20} = \frac{P_{P20}}{S_{D20}} = \frac{440,0}{666,033} = 0,6606 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт реактивного навантаження СЕП (діюче значення)

$$\operatorname{tg}\varphi_{D20} = \frac{Q_{D20}}{P_{P20}} = \frac{500,0}{440,0} = 1,1364 \text{ в.о.}$$

Активні втрати трансформатора, за (7)

$$D_{PTO} = 1,310 + 7,6 \cdot 1,057^2 = 9,801 \text{ кВт.}$$

Реактивні втрати трансформатора (діюче значення), за (9)

$$D_{QD0} = 13,332 + 24,270 \cdot 1,057^2 = 40,448 \text{ квар.}$$

Втрати напруги у трансформаторі, за (13)

$$\Delta U_{T1} = ((440,0 + 9,801) \cdot 0,0031 + (500,0 + 40,448) \cdot 0,0140) / 0,392 = 22,9 \text{ В.}$$

Напруга точки 2

$$U_{21} = U_{20} - \Delta U_{T1} = 392,0 - 22,9 = 369,1 \text{ в.о.}$$

Оскільки $U_{21} < 390,0 \text{ В}$, то електромагнітна сумісність СЕП не забезпечується і необхідно рекомендувати запровадження компенсації реактивного навантаження СЕП за допомогою конденсаторних установок з номінальною напругою їх конденсаторів $U_{НОМ} = 0,4 \text{ кВ}$.

За рекомендацією [10] її потужність визначається за формулою

$$Q_{KH} = \sqrt{2} \cdot P_{P1} \cdot (\operatorname{tg}\varphi_{D1} - \operatorname{tg}\varphi_H), \quad (40)$$

де P_{P1} - активне навантаження точки 1 без компенсації її реактивного навантаження

$$P_{P1} = P_{P20} + D_{PTO} = 440,0 + 9,801 = 449,801 \text{ кВт};$$

$\operatorname{tg}\varphi_H$ - нормативний коефіцієнт реактивного навантаження СЕП, який табл.3 рекомендує на рівні $\operatorname{tg}\varphi_H = 0,2399 \text{ в.о.}$

Реактивне навантаження точки 1 без компенсації реактивного навантаження СЕП:

$$Q_{D1} = Q_{D20} + D_{QD0} = 500,0 + 40,448 = 540,448 \text{ квар.}$$

При цьому:

$$\operatorname{tg}\varphi_{D1} = \frac{Q_{D1}}{P_{P1}} = \frac{540,448}{449,801} = 1,2015 \text{ в.о.}$$

$$Q_{KH} = \sqrt{2} \cdot 449,801 \cdot (1,2015 - 0,2399) = 611,688 \text{ квар.}$$

Приймається стандартна конденсаторна установка $Q_{KH} = 615,0 \text{ квар}$, яка за даними [13] коштує на рівні $K_{KH} = 25275400 \text{ грн.}$

Розрахункова точка 0 з компенсацією реактивного навантаження СЕП.

Активне навантаження

$$P_{POK} = 470,0 + 0,0003 \cdot 615,0 = 470,184 \text{ кВт.}$$

Реактивне діюче навантаження

$$Q_{DOK} = 510,0 - 615,0 / \sqrt{2} = 75,129 \text{ квар.}$$

Повне діюче навантаження споживача

$$S_{DOK} = \sqrt{P_{POK}^2 + Q_{DOK}^2} =$$

$$= \sqrt{470,184^2 + 75,129^2} = 476,148 \text{ кВА.}$$

Розрахунковий струм навантаження СЕП

$$I_{POK} = \frac{S_{DOK}}{\sqrt{3} \cdot U_{01}} = \frac{476,148}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 43,6 \text{ А.}$$

Коефіцієнт реактивного навантаження

$$\operatorname{tg}\varphi_{DOK} = \frac{Q_{DOK}}{P_{POK}} = \frac{75,129}{470,184} = 0,1598 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт активного навантаження

$$\cos\varphi_{OK} = \frac{P_{POK}}{S_{DOK}} = \frac{470,184}{476,148} = 0,9875 \text{ в.о.}$$

Втрати напруги кабельної лінії

$$\begin{aligned} \Delta U_{KLOK} &= \sqrt{3} \cdot I_{POK} \cdot (R_{KL} + X_{KL}) \cdot 10^{-3} = \\ &= \sqrt{3} \cdot 43,6 \cdot (2,2250 + 0,2175) \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,184 \text{ кВ.} \end{aligned}$$

Напруга точки 1

$$U_{1K} = U_{01} - \Delta U_{KLOK} = 6,3 - 0,184 = 6,116 \text{ кВ.}$$

Розрахункова точка 2

Активне навантаження

$$P_{2K} = 440,0 + 0,0003 \cdot 615,0 = 440,184 \text{ кВт.}$$

Реактивне діюче навантаження

$$Q_{2K} = 500,0 - 615,0 / \sqrt{2} = 65,129 \text{ квар.}$$

Повне діюче навантаження

$$S_{2K} = \sqrt{440,184^2 + 65,129^2} = 444,976 \text{ кВА.}$$

Коефіцієнт навантаження трансформатора

$$\beta_{TK} = \frac{444,976}{630,0} = 0,706 \text{ в.о.}$$

Активні втрати трансформатора

$$D_{PTK} = 1,310 + 7,6 \cdot 0,706^2 = 5,098 \text{ кВт.}$$

Реактивні діючі втрати трансформатора

$$D_{QD0} = 13,332 + 24,270 \cdot 1,057^2 = 40,448 \text{ квар.}$$

При цьому, вторинна напруга трансформатора СЕП становить величину

$$\begin{aligned} U_{2K} &= U_{1K} \cdot 10^3 / K_{T0} = \\ &= 6,116 \cdot 10^3 / 15,375 = 397,8 \text{ В.} \end{aligned}$$

Таким чином, конденсаторна установка СЕП має бути регульованою за величиною напруги точки 2 або за величиною коефіцієнта її реактивного навантаження і в режимі мінімального навантаження споживача має бути відімкненою.

У економічному аспекті компенсація реактивного навантаження характеризується коефіцієнтами, рекомендованими в [10], які визначаються витоком електроенергії, зафіксованої комерційним її обліком у розрахунковому

періоді роботи конкретної СЕП.

Наприклад, виток електроенергії СЕП у минулому розрахунковому періоді (календарний місяць, який мав 24 робочих доби), зафіксований комерційним її обліком, складає величину:

Активної – $WP = 107360 \text{ кВт} \cdot \text{год.} / \text{міс.}$

Реактивної – $WQ = 116496 \text{ грн.} / \text{міс.}$

Вартість активного електроспоживання становить – $SeP = 18036480 \text{ грн.} / \text{міс}$

При цьому, діюче значення коефіцієнта реактивного навантаження становить

$$\text{tg}\varphi_D = \frac{WQ}{WP} = \frac{116496}{107360} = 1,0851 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт впливу реактивного навантаження на втрати активної енергії, який визначається формулою (34)

$$K_{\Delta P Q} = \frac{1,0851^2 - 0,2399^2}{1 + 1,0851^2} = 0,5143 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнтом впливу реактивного навантаження на пропускну спроможність електричних мереж ЕЕС, який визначається формулою (37)

$$K_{\Delta S Q} = \frac{\sqrt{1 + 1,0851^2} - \sqrt{1 + 0,2399^2}}{\sqrt{1 + 1,0851^2}} = 0,3031 \text{ в.о.}$$

При цьому: $\text{tg}\varphi_D$ – діюче значення коефіцієнта реактивного навантаження СЕП в режимі її максимального навантаження, в.о.; $\text{tg}\varphi_H$ – нормативне значення згаданого коефіцієнта, яке має бути залежним від номінальної напруги електропередавання, матеріалу і перерізу її струмоведучих частин, в.о.

Числові значення такого нормативного коефіцієнта наведено в табл. 5. Їх можна вважати економічним еквівалентом реактивного навантаження конкретного трансформатора.

Збиток споживача від збільшення активних втрат його наднормативного реактивного навантаження визначається формулою (36)

$$Se_{\Delta Q} = 18039480 \cdot 0,5143 = 92777,05 \text{ грн.} / \text{міс.}$$

При цьому збиток споживача від зменшення пропускну спроможності електричних мереж ЕЕС визначається формулою (38)

$$Se_{\Delta S} = 0,033 \cdot 0,3031 \cdot 92777,05 = 927,98 \text{ грн.} / \text{міс}$$

Загальний збиток за формулою (39)

$$Se_{\Delta S} = (0,5143 + 0,033 \cdot 0,3031) \cdot 18039480 = 9458141 \text{ грн.} / \text{міс.}$$

При цьому, строк окупності конденсаторної установки, визначений за відомою формулою складає

$$T_{OK} = \frac{K_{KH}}{CeQ} = \frac{25275400}{9458141} = 2,7 \text{ міс.}$$

Як можна бачити, строк окупності конденсаторної установки не перебільшує 0,25 року, що свідчить про економічну доцільність її застосування.

Висновки

1. Робочим інструментом електропередавання, як діючої електроустановки, є геометрична сума електромагнітних полів електроприймачів СЕП конкретному споживачу напруги, як потенційної енергії згаданих полів.

2. Спираючись на принцип суперпозиції, фізично, електромагнітне поле електропередавання можна вважати загальним квантоном електрично пружного діелектричного середовища, яке оточує його струмоведучі частини.

3. Заступна схема електропередавання, як діючої електроустановки є своєрідним містком для переходу від фізики його роботи до математики (і навпаки) який працює для кожного його проводу, прямого і зворотнього, (для кожної фази трифазної електричної мережі).

4. Прямий провід електропередавання передає до приймального пункту електроенергії в СЕП конкретному її споживачу позитивний потенціал джерела електроенергії (напруги) в ЕЕС, а зворотній (зворотні) – негативний потенціал.

5. Квантон, фізично, будь-якої діючої електротехнічної установки (у тому числі і електропередавання) є результатом спотворення кругових полів молекул їх діелектричного середовища одночасною дією на них напруги і струму провідності їх струмоведучих частин за постійного впливу на них магнітного поля Землі (як невід'ємної робочої пари її поля гравітації), за якого внутрішня електромагнітна енергія поля молекул виходить за їх межі і може виконувати корисну роботу – крутить, світить, нагріває.

6. Математично, електромагнітне поле квантона можна представляти сумою двох умовних квантонів квантона напруги і квантона струму провідності струмоведучих частин.

7. Квантон напруги – сукупна дія на діелектричне середовище електропередавання синусоїдальної напруги його струмоведучих частин і магнітного поля Землі, який діє у поздовжньому напрямку електропередавання.

8. Квантон струму – сукупна дія на діелек-

тричне середовище електропередавання синусоїдального струму провідності його струмоведучих частин і магнітного поля Землі, який діє у поперечному напрямку електропередавання.

9. Теорія квантування надає фізичної суті математичному розумінню активної і реактивної складової електромагнітної енергії, яка вважається промисловою продукцією електроенергетики.

10. Статична векторно-квантова модель, яку пропонує дана робота значно спрощує визначення і розрахунки активно і реактивної потужності (енергії) СЕП конкретним споживачам електроенергії.

11. Співвідношення реактивної і активної потужності (енергії) можна вважати головним критерієм електромагнітної сумісності електропередавання, яке необхідно нормувати кожному юридичному споживачу і вимагати додаткову плату за його відхилення від норми.

12. Як показує приклад, компенсація надлишкового реактивного навантаження СЕП є економічно доцільним міроприємством.

Список використаної літератури

1. 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.

2. Правила устройства электроустановок [Текст] / –Х.: Изд-во “Форт”, 2017. –704 с.

3. Дорошенко, О. І. Визначення базової (оптової) ціни на електроенергію для промислових споживачів [Текст] / О. І. Дорошенко, О. В. Романюк, С. А. Песков, С. О. Борисенко // Технологический аудит и резервы производства - № 5/1(25). Харьков, 2015. – С. 35–38. DOI: 10/15587/2312-8372.2015.49134.

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

5. Леонов, В. С. Теория упругой квантованной среды. Часть 2. Новые источники энергии. [Текст] / В. С. Леонов // Минск: «ПолиБиг», 1997. – 122 с

6. 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.

7. Бучковский, И. Р. Физические явления внутреннего резонанса в электрооборудовании с обмотками высокого напряжения [Текст] / И. Р. Бучковский, М. М. Молнар, А. Л. Никонец, Л. А.

Никонец, М. Б. Сабо / Под ред. Никонца А. Л. // Львов: НВФ «Українські технології»,2012.–167 с.

8. Справочник по проектированию электрических сетей. Под. ред. Д. Л. Файбисовича [Текст] / И. Г. Карапетян, Д. Л. Файбисович, И. М. Шапиро // – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.

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

10. Дорошенко, О. І. Методика нормування головного критерію електромагнітної сумісності систем електропостачання промисловим і дорівненим до них споживачам електроенергії [Текст] / О. І. Дорошенко, А. С. Пасько // Електротехнічні та комп'ютерні системи . – Астропринт, 2019. – № 31(107). – С. 51–62.

11. Дорошенко, О. І. Про моделювання в електропостачанні [Текст] / О. І. Дорошенко, С. О. Борисенко // Електротехнічні та комп'ютерні системи . – Астропринт, 2017. – № 25(101). – С. 168–176.

12. 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.

13. Сайт Voitenego@com.ua.

References

1. GOST 13109–97. Interstate standard. Electric Energy. Electromagnetic compatibility. Quality standards for electric energy in general power supply systems [Mezhgosudarstvennyy standart. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya] Minsk: Publishing house of standards, 1998. – 31 p.

2. Rules for the installation of electrical installations [Pravila ustroystva elektroustanovok] (2017) Publishing house “Fort”, –704 p.

3. Doroshenko, O. I., Romanyuk, O. V., Peskov, S. A., Borysenko, S. O. (2015) Determination of the base (wholesale) price for electricity for industrial consumers [Vyznachennya bazovoyi (optovoyi) tsiny na elektroenerhiyu dlya promyslovykh spozhyvachiv] Technology audit and production reserves No. 5/1 (25). Kharkiv, P.35–38. DOI: 10/15587 / 2312-8372.2015.49134.

4. Leonov, V. C. (1996) Theory of an elastic quantized medium. [Theoriya uprugoy kvantovannoy sredy] Mn. Bisprint. – 156 p.
5. Leonov, V. C. (1997) Theory of an elastic quantized medium/ Part 2. Nev enegy sources. [Theoriya uprugoy kvantovannoy sredy. Chast 2/ Novyye istochniki tntrgii.] Minsk: Polybig.. – 122 p.
6. Technique of performing control measurements of actual electric power in consumers at hours of maximum load of the unified energy system of Ukraine [Metodyka provedennya kontrol'nykh vymiriv faktychnoyi elektrychnoyi potuzhnosti v spozhyvachiv u hodyny maksimumu navantazhennya ob'yednanoi enerhetychnoyi systemy Ukrayiny] (2004) Fort Publishing House. Kharkiv, – 11 p.
7. Buchkovsky, I. R., Molnar, M. M., Nikonets, A. L., Nikonets, L. A., Sabo, M. B. (2012) Physical phenomena of internal resonance in electrical equipment with high voltage windings [Fizicheskiye yavleniya vnutrennego rezonansa v elektrooborudovanii s obmotkami vysokogo napryazheniya] Lvov: Scientific-Industrial Fund "Ukrainian Technologies", 167 p.
8. Faybisovich, D. L., Karapetyan, I. G., Shapiro, I. M. (2006) Reference design of electrical networks. Under. Edited by D. L. Faybisovich [Spravochnik po proyektirovaniyu elektri-cheskikh setey], M.: Publishing House NTs ENAS, 320 p.
9. Doroshenko, O. I., Borisenko, S. O., Nenov, P. P., Pasko, A. S. (2019) On the normalization of reactive load for industrial and related consumers of electricity [Pro normuvannya reaktivnoho navantazhennya promyslovym i dorivnenym do nykh spozhyvacham elektroenerhiyi] Electrical and computer systems. Astroprint,. No. 30 (106). p. 54–62.
10. Doroshenko, O. I., Pasko, A. S. (2019) Methods of rationing the main criterion of electromagnetic compatibility of power supply systems for industrial and electricity consumers equal to them. [Metodyka normuvannya holovnoho kryteriyu elektromahnitnoyi sumisnosti system elektropostachannya promyslovym i dorivnenym do nykh spozhyvacham elektroenerhiyi] Electrical and computer systems. Astroprint, № 31 (107). P. 51–62.
11. Doroshenko, O. I., Borisenko, S. O. (2017) About modeling in power supply [Pro modelyuvannya v elektropostachanni] Electrical and computer systems. No. 25 (101). pp. 168–176.
12. Bogoroditsky, N. P., Pasyukov, V. V., Tareev, B. M. (1985) Electrotechnical materials [Elektrotekhnicheskiye materialy] Textbook for universities. 7th edition L.:Energoatomizdat, Leningrad. 304 p.
13. Website Voitenergo@com.ua

ABOUT PHYSICS AND MATHEMATICS OF POWER SUPPLIES INDUSTRIAL AND SIMILAR TO THEM POWER CONSUMERS

O. I. Doroshenko¹, S. A. Borisenko²

¹Odessa National Polytechnic University

²OOO "Odeleko"

Abstract. Based on modern quantum physics, an original approach is proposed to the principle of modeling the transmission of electrical energy to industrial and equated consumers with a design power of up to 1000 kVA, which is performed using transformers of the TM-6 (10) / 0.4 kV type, provided that their secondary voltage is a potential form of the SES electromagnetic energy supplied to such consumers. At the same time, the normal mode of the maximum load of the transformer is considered when its active and reactive loads are equal, at which the reactive load factor of the consumer's power supply system has the highest permissible value (the phase angle of the sinusoidal voltage current is zero). A static vector-quantum model of a transformer power transmission has been developed, which simplifies the understanding of the process of compensating for the reactive load of a transformer and makes it possible to refine the operating power of a capacitor bank with 0.4 kV capacitors. At the same time, the idea is confirmed that the value of the reactive load factor of a transformer is not only the main criterion for the electromagnetic compatibility of the SES of a particular electricity consumer, but also a criterion for its economic efficiency. Using the numerical value of such a coefficient, it is possible to determine the value of the economic equivalent of the reactive load of a particular SES.

Keywords: *real-mathematical modeling in the electric power industry, quantization of an electrically spring dielectric transmission medium, electromagnetic field, electromagnetic compatibility, the main criterion for electromagnetic compatibility of electric power systems.*

**ПРО ФИЗИКУ И МАТЕМАТИКУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫМ И ПРИРАВНЕННЫМ К НИМ
ПОТРЕБИТЕЛЯМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

А. И. Дорошенко¹, С. А. Борисенко²

¹Одесский национальный политехнический университет

²ООО «Оделеко»

Аннотация. *Опираясь на современную квантовую физику, предлагается оригинальный подход к принципу моделирования передачи электрической энергии промышленным и приравненным к ним потребителям электроэнергии, которое осуществляется при условии того, что напряжение токоведущих частей электропередачи, как действующей электроустановки, является потенциальной формой электромагнитной энергии СЭС упомянутым потребителям. Разработана статическая векторно-квантовая модель такой электропередачи, предполагая, что главным критерием электромагнитной совместимости такой электропередачи является коэффициент реактивной нагрузки такой конкретной системы. Предлагается такие коэффициенты нормировать конкретным юридическим потребителям электроэнергии в зависимости от параметров электрической сети их присоединения к источникам напряжения в ЭЭС.*

Ключевые слова: *реально-математическое моделирование в электроэнергетике, квантование электрически пружинной диэлектрической среды электропередачи, электромагнитное поле, электромагнитная совместимость, главный критерий электромагнитной совместимости энергетических систем.*

Отримано 26.03.2020



Дорошенко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченко, 1, Одеса, Україна, 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



Борисенко Світлана Олександрівна, інженер-проектувальник ООО «Оделеко», вул. Люстдорфська дорога, 140-б, Одеса, Україна. E-mail: sborisenko1975@gmail.com, тел. +38-097-219-62-01.

Borisenko Svitlana, engineer-designer ООО "Odeleko", street of Lustdorf road, 140-b, Odesa, Ukraine. E-mail: sborisenko1975@gmail.com, tel. 38-097-219-62-01

ORCID: 0000-0002-3298-8047