

УДК 621.371: 621.314.4

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

ПРО МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОНКРЕТНИХ ПРОМИСЛОВИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Анотація. Пропонується оригінальний підхід до математичного моделювання систем електропостачання конкретних промислових споживачів електроенергії, який спирається на фізику процесу електропередавання і дозволяє розкрити сутність розуміння електроенергії, як фізичного явища та як товарної продукції електроенергетичних систем, що продається і купується на енергоринку.

Ключові слова: електрична енергія, електроенергетична система, активне і реактивне навантаження, передавання електроенергії в електроенергетичних системах.

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

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОНКРЕТНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. Предлагается оригинальный подход к математическому моделированию систем электроснабжения конкретных промышленных потребителей электроэнергии, который опирается на физику процесса электропередачи и позволяет раскрыть сущность понятия электроэнергии, как физического явления и как товарной продукции электроэнергетической системы, которая продается и покупается в Энергорынке.

Ключевые слова: электрическая энергия, электроэнергетическая система, активная и реактивная нагрузка, передача электроэнергии в электроэнергетических системах.

Doroshenko A. I., PhD.,
Levakin M. S.

ABOUT MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRICAL SYSTEMS SPECIFIC INDUSTRIAL ENERGY CONSUMERS

Abstract. We propose an original approach to mathematical modeling of electrical systems of specific industrial consumers of electricity, which relies on the physics of the process of transmission and allows to reveal the essence of the understanding of electricity as a physical phenomenon and as commercial products electric power systems that is bought and sold on the energy market.

Keywords: electric energy, electric power systems, active and reactive load, transmission of electric energy in power systems

Вступ. Як відомо, будь-яка електроенергетична система (ЕЕС) – це достатньо складна за технологією нормального функціонування сукупність електроустановок, робочі процеси яких відбуваються, майже, одночасно. Тому її дослідження та вивчення, з метою нормалізації, це спеціальна електроенергетична наука, яка не є можливою без моделювання таких процесів. При цьому, найбільш поширеним видом моделювання є математичне моделювання.

За визначенням [1], сутність математичного моделювання полягає у тому, що необхідно віднайти таке математичне співвідношення між параметрами елементів системи і параметрами їх режиму, за яких така система

успішно виконувати свою функцію – безпечно, економно та безперебійно постачати споживачам електричну енергію (електроенергію), встановленої державними стандартами якості.

За твердженням [2], при математичному моделюванні: "...Математическая постановка технической задачи является самой сложной и важной частью работы. Важны не столько выбираемые математические методы расчета, сколько выбранные методы упрощения первоначальной, подлежащей решению физической задачи. Об этом забывают авторы разнообразных математических моделей, для многих из которых само математическое моделирование превратилось из

инструмента для исследования в самоцель. Между ними даже развернулось соревнование – кто сделает модель какого-либо элемента «круче». Моделей много, а посчитать что-то конкретно – возможности нет...».

Таким чином, проблема визначення науково-методичного підходу до моделювання в електроенергетиці та в її підсистемах є завжди актуальною. Тому, мета даної роботи – дослідження ступеня відповідності сучасної математичної моделі електромагнітного поля системи електропостачання (СЕР) промислових споживачів електроенергії, фізиці його функціонування, як її робочого інструмента.

Результати дослідження. Спираючись на [3], в роботі [4] було підтверджено, що фізично, електроенергія є енергією електромагнітного поля згаданих систем, яке створюється одночасною дією напруги і струму провідності струмоведучих частин кожного елемента таких систем на діелектричне середовище цих елементів. Оскільки, при цьому, вони діють у двох взаємно перпендикулярних напрямках (уздовж і поперек до напрямку електропередачі) то енергію поляризації електрично пружного діелектричного середовища таких систем можна, умовно, розкласти на активну (уздовж напрямку електропередачі) та реактивну (поперек напрямку електропередачі) електроенергію.

Як відомо з [3], математичною моделлю електромагнітного поля будь-якої ЕЕС вважається теорема Пойтинга, яку для миттєвих значень синусоїдальної напруги і синусоїдального струму провідності її струмоведучих частин, що відстає від напруги на фазовий кут φ , можна представити у вигляді, кВА

$$\begin{aligned} s &= u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= \sqrt{2} \cdot U \sin \omega t \cdot \sqrt{2} \cdot I \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= 2 \cdot U \cdot I \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= \frac{2 \cdot U \cdot I}{2} \cdot [\cos(\omega t - \omega t + \varphi) - \\ &\quad - \cos(\omega t + \omega t - \varphi)] = \\ &= U \cdot I \cdot (\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)) = \\ &= U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t - \varphi), \quad (1) \end{aligned}$$

де u - миттєве значення синусоїдальної напруги, кВ; i - миттєве значення синусоїда-

льного струму провідності, А; U_m - амплітудне значення синусоїдальної напруги, 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.

Графік залежності $s = f(t)$, побудований в математичному середовищі МATHCAD за допомогою рівняння (1), як математична модель електромагнітного поля ЕЕС, представлено на рис.1.

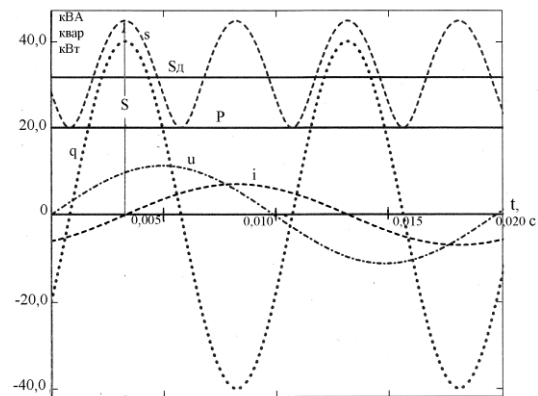


Рис.1. Математична залежність $s = f(t)$

Таким чином, математичне моделювання ЕЕС дозволяє представляти енергію її електромагнітного поля у вигляді двох складових, які визначаються синусоїдальними напругою і струмом провідності струмоведучих частин системи та кутом зсуву таких режимних характеристик системи.

Вважаючи, що розрахункове значення повної потужності електромагнітного поля S (його діюче значення) є потужністю поляризації об'ємного діелектричного середовища ЕЕС та, спираючись на рівняння (1), на практиці припускають, що перша складова цього рівняння є поздовжньою складовою (у напрямку електропередачі) повної потужності електромагнітного поля системи. Її називають активною потужністю ЕЕС, позначають літерою P і визначають як, кВт

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (2)$$

Другу складову рівняння (1) вважають поперечною складовою (у напрямку

електропередачі) повної енергії електромагнітного поля системи, називають реактивною потужністю ЕЕС, позначають літерою Q і визначають як, квар

$$Q = U \cdot I \cdot \cos(90^\circ \mp \varphi) = U \cdot I \cdot \sin \varphi. \quad (3)$$

Подвійний знак \mp цього рівняння має свідчити про те, що реактивна енергія може не тільки споживатись в СЕП конкретного споживача, а й генеруватись, у залежності від того, струм провідності струмоведучих частин системи відстає за фазовим кутом φ від їх напруги, чи випереджає його.

При цьому, повну діючу потужність визначають за формулою, кВА

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (4)$$

Таке умовно-математичне моделювання допускає наявність двох окремих видів електроенергії (активної та реактивної), які генеруються генераторами електростанцій ЕЕС і за допомогою електричних мереж електропередавальних організацій (ЕО) передаються до СЕП споживачів. Їх «виток» в СЕП конкретного споживача визначають за допомогою спеціальних комерційних лічильників електроенергії та сплачують за окремими тарифами на активну і реактивну електроенергію. Принципову схему вмикання вимірювальних елементів комерційного лічильника активної електроенергії наведено на рис.2.

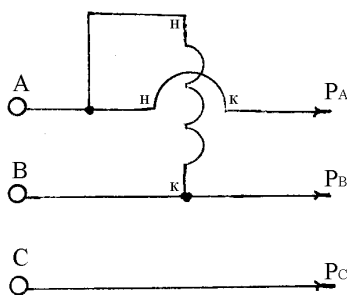


Рис.2. Лічильник активної електроенергії

Як відомо, умовно-математична модель електропередачі передбачає два режими її роботи по реактивному навантаженню: режим “споживання” та режим “генерування”.

У першому випадку синусоїдальний струм навантаження відстає на розрахунковий фазовий кут φ_p від синусоїдальної на-

пруги живлення, а у другому – випереджає на величину згаданого кута.

Принципові схеми вмикання вимірювальних елементів комерційного лічильника реактивної електроенергії наведено на рис.3.

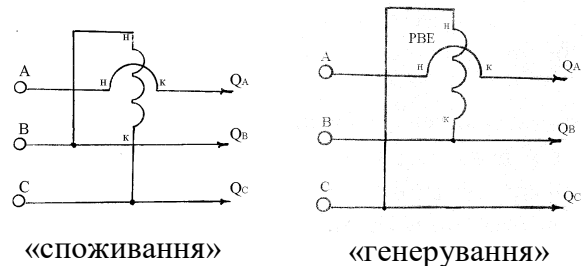


Рис.3. Лічильник реактивної електроенергії

Очевидно, що умовно-математична модель електромагнітного поля ЕЕС (рівняння (3)) потребує надійного фізичного обґрунтування її функціонування. Вона має бути адекватною до математичної моделі (рівняння (1)) і використовувати її математику, але всі її математичні викладки повинні мати чітке фізичне обґрунтування.

З цією метою, в роботі [5], було запропоновано реально-математичну модель електромагнітного поля ЕЕС, яке існує у її поляризованому діелектричному середовищі, представляти у вигляді залежності миттєвого значення повної потужності $s = f(\cos \varphi)$ у вигляді рис.4.

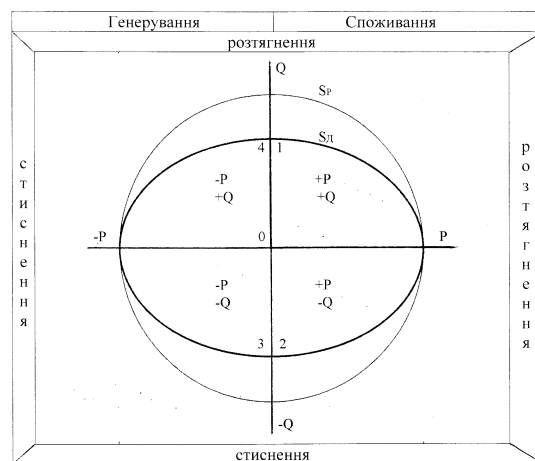


Рис.4. Реально-математична модель електромагнітного поля ЕЕС

Очевидно, що значення s_p відповідає амплітудному значенню реактивної потужності умовно-математичної моделі поля (рівняння (3)), а значення s_d – її діючому

значенню, яке можна визначити за формулою, квар

$$Q_D = Q_P / \sqrt{2}. \quad (5)$$

При цьому, напруга струмоведучих частин стискає електрично пружне діелектричне середовище ЕЕС, струм їх провідності – розтягує таке середовище. При цьому, знак плюс потужності означає її споживання, а знак мінус – її генерування і, за висновком в [6], це енергія електромагнітного поля ЕЕС як вихороподібна хвиля енергії поляризації електрично пружного діелектричного середовища системи одночасною дією на нього напруги і струму провідності її струмоведучих частин, що біжить від джерела живлення системи напругою до її електроприймачів, а напругу можна розглядати як потенційну форму електроенергії такої системи.

За синусоїдального струму провідності струмоведучих частин системи, що відстає за фазою від їх синусоїдальної напруги реально-математична модель СЕП конкретного споживача набуває вигляду рис.5.

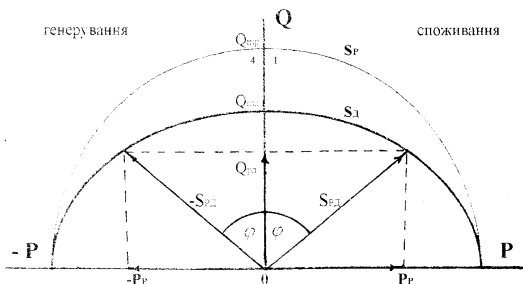


Рис.5. Режим ЕЕС з відстаючим від напруги струмом навантаження

Як можна бачити, генерування (перетворення потенційної форми електроенергії (напруги) в електродинамічну і її споживання відбувається в СЕП конкретного споживача одночасно. При цьому, можна написати таке співвідношення

$$\left. \begin{aligned} U_1 &\equiv S_D \\ U_2 &\equiv P_P \\ E &\equiv Q_D \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де U_1 - напруга джерела живлення СЕП в максимальному режимі навантаження, кВ; U_2 - поздовжня складова напруги живлення СЕП у згаданому режимі; S_D - діюче зна-

чення повної потужності СЕП, що визначається за формулою, кВА

$$S_D = \sqrt{P_P^2 + (Q_P / \sqrt{2})^2} = \sqrt{P_P^2 + Q_P^2 / 2}; \quad (7)$$

P_P - розрахункове активне навантаження СЕП конкретного споживача, кВт; E - поперечна складова напруги живлення споживача, як електрорушійна сила самоіндукції електромагнітного поля його СЕП у максимальному режимі навантаження, кВ; Q_D - діюче значення реактивної потужності СЕП конкретного споживача, що визначається за формулою (5), квар.

Вважаючи напругу потенційною формою електроенергії, реально-математичну модель для режиму СЕП за рис.5, можна представити у вигляді рис.6.

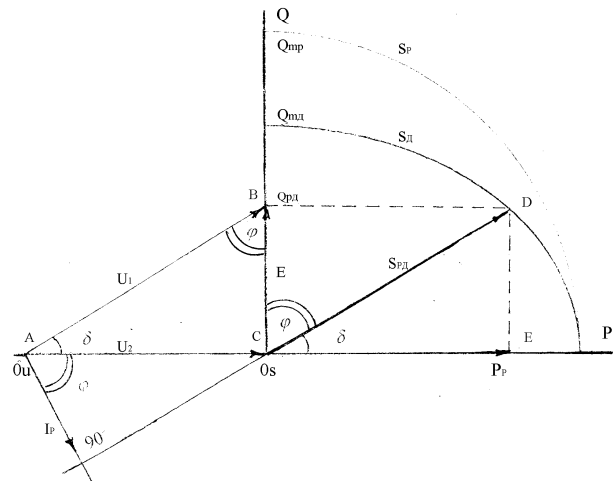


Рис.6. Реально-математична модель промислового електроспоживання

Як можна бачити: ϕ - кут зсуву фаз напруги і струму максимального навантаження СЕП, град.; δ - кут зсуву фаз між напругою джерела живлення СЕП і його поздовжньою складовою, град. При цьому $\phi + \delta = 90^\circ$.

Приклад розрахунку. Номінальна напруга споживача 6 кВ, яку він одержує від системної підстанції 110/6 кВ. За даними комерційного обліку, у розрахунковому періоді:

$U_1 = 1,05 \cdot U_{НОМ}$ в.о.; $P_P = 560$ кВт; $Q_P = 480$ квар. При цьому:

За діючою умовно-математичною моделлю $S_P = \sqrt{560^2 + 480^2} = 737,564$ кВА

За реально-математичною моделлю

$$S_D = \sqrt{560^2 + 480^2} / 2 = 654,828 \text{ кВА.}$$

При цьому, робоча напруга СЕП складає

$$U_2 = U_1 \cdot \cos \varphi_D = U_1 \cdot P_p / S_D =$$

$$= 1.05 \cdot 6 \cdot 560 / 654,828 = 5,388 \text{ кВ.}$$

$$U_2 / U_{НОМ} = 5,388 / 6,0 = 0,898 \text{ в.о.}$$

Висновки.

1. В електропостачанні діє умовно-математична модель, у якій математика визначення реактивного навантаження СЕП конкретного споживача електроенергії не спирається на фізику процесу її утворення.

2. При визначенні потужності реактивного навантаження СЕП конкретного споживача необхідно попередньо визначити її діюче значення, зменшуючи розрахункове значення у $\sqrt{2}$ разів.

Список використаної літератури

1. Веников, В. А. Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики [Текст] / В. А. Веников. – М.: Высшая школа, 1966. – 487 с.

2. Никонец, Л. А. 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. Сабат; под ред. Л. А. Никонца. – Львов: НВФ «Українські технології», 2012. – 167 с.

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

4. Дорошенко, О. І. Про математику і фізику електропередачі [Текст] / О. І. Дорошенко // Матеріали X-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Новини наукової думки» 22–30 жовтня 2014 р., Прага. – С. 15–22.

5. Дорошенко, О. І. Розроблення фізичної бази для математичного моделювання процесу електропередавання [Текст] / О. І. Дорошенко, О. В. Романюк, С. О. Борисенко // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – №4/1 (24). – С. 51 – 55.

6. Дорошенко, О. І. Визначення впливу реактивного навантаження електроенергетичної системи на виток її електроенергії

[Текст] / О. І. Дорошенко, К. С. Гусак, О. В. Романюк // Электротехнические и компьютерные системы. – Киев: Техника, 2015. – Вып.20 (96). – С. 22 – 29.

Одержано 22.04.2016 р.

References.

1. Brooms V. A. Theory of similarity and modeling in relation to the problems of electric power industry M: Highest school, 1966. – 487 p. (In Russian).

2. Buckovski I. R., Molnar M., Nikonets L. A., Sabat M. B. The Physical phenomenon of internal resonance in electrical equipment with high voltage windings Lviv: IAF "Ukrainian technology", 2012. – 167 c.

3. Bessonov L. A. Theoretical foundations of electrical engineering Ed. 6. M.: Higher school, 1973. – 752 p. (In Russian).

4. Doroshenko O. I. About mathematics I fsico elektropredachi *Materials of the X scientific Internet conference "News of young."* 22-30 October, 2014, Prague. – P. 15-22.

5. Doroshenko O. I., Romanyuk O. V., Borisenko S. O. Rosablanca Ficino bazi for mathematical modeling of biological processes elektropredacha *Technology audit and production reserves.* – 2015. – №4/1 (24). – P. 51 – 55.

6. Doroshenko O. I., Husak K. S., Romaniuk O. V. Vyznachennya vpliva navantazhennya Elektroenergetyczne jet systems on coil electroenergy *Electrotechnical and computer systems.* – Kiev: Technology, 2015. – Vol.20 (96). – S. 22 – 29.



Дорошенко Олександр Іванович, к.т.н., доц. каф. ел. пос. та енергом. ОНПУ
м/т: 067-267-95-89,
e-mail: dai1938@yandex.ua



Левакін Максим Сергійович, маг. каф. ел. пос. та енергом. ОНПУ
м/т: 050-146-01-80.
e-mail: madmaxlad@mail.ru