

Онищенко Олег Анатольевич, доктор технических наук, профессор, кафедра технической эксплуатации флота, Одесская национальная морская академия, Украина, e-mail: olegoni@mail.ru.

Букарос Андрій Юрійович, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра електромеханіки, Одеська національна академія харчових технологій, Україна.

Букарос Валерія Миколаївна, викладач спеціалізації, Відокремлений структурний підрозділ «Училище № 3 Національного університету «Одеська юридична академія», Україна.

Онищенко Олег Анатолійович, доктор технічних наук, професор, кафедра технічної експлуатації флоту, Одеська національна морська академія, Україна.

Bucaros Andrey, Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine, e-mail: bucaros@mail.ru.

Bucaros Valeriya, Separate structural unit «School № 3», National University «Odessa Law Academy», Ukraine, e-mail: eralife84@gmail.com.

Onishchenko Oleg, Odessa National Maritime Academy, Ukraine, e-mail: olegoni@mail.ru

УДК 621.371:621.311.4

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.47770

**Дорошенко О. І.,
Романюк О. В.,
Борисенко С. О.**

РОЗРОБЛЕННЯ ФІЗИЧНОЇ БАЗИ ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Спираючись на фізику нормального режиму роботи електроенергетичних систем, у статті пропонується новий науково-методичний підхід до визначення розуміння реактивної потужності електропередачі до систем електропостачання промислових і дорівнених, до них споживачів. Доведено, що у якості її реактивного розрахункового значення, замість амплітудного, необхідно приймати діюче значення.

Ключові слова: електропостачання, моделювання електропередачі, електроенергія, активна потужність, реактивна потужність, повна потужність.

1. Вступ

Як відомо, передавання електричної енергії (електропередача) є найбільш поширеною функцією електроенергетичної системи (ЕЕС). Фізично, її здійснюють електричні мережі (ЕМ) цієї системи, які складаються з ліній електропередачі (повітряних і кабельних) та підстанцій (трансформаторних і розподільних). Таку сукупність, призначену для передачі електроенергії до конкретного приймального пункту називають електропередачею, яку можна розглядати окремим об'єктом ЕЕС. При цьому, як відомо з теоретичних основ електротехніки (ТОЕ) (наприклад, з [1]) електроенергія, фізично, є енергією електромагнітного поля ЕЕС, яке створюється одночасною дією напруги і струму провідності струмоведучих частин цієї системи, на діелектричне середовище, що оточує усі такі її частини.

Очевидно, що електромагнітним полем називається такий стан згаданого діелектричного середовища, за якого у ньому починають діяти електричні сили Кулона і магнітні сили Кариоліса. Таким чином, створюється враження про те, ніби, одночасно діють два види енергії: електрична і магнітна.

При цьому, математичний формалізм, що панує сьогодні в електроенергетиці не дає змоги зрозуміти фізику реального процесу електропередачі. Так, наприклад, нормативний документ [2] стверджує, що споживачеві передається електрична енергія, як товарна продукція електроенергетичної системи, двох видів — активна та реактивна. За їх споживання споживачеві нараховується окрема плата. Аналогічний підхід до розуміння реактивної електроенергії є характерним і для зарубіжжя.

Але, як відомо з [3, 4], реактивної енергії як окремого виду електричної енергії, фізично, не може бути. Тому очевидно, що є актуальним проведення наукових досліджень, які можуть підтвердити, або спростувати думку про те, що реактивна електроенергія може бути окремим видом енергії, яку можна передавати споживачеві від її генераторів з ЕЕС.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Як відомо з теоретичних основ електротехніки [1], математично, потужність будь-якої частини ЕЕС визначається теоремою Пойтінга. За синусоїдальних напруги і струму провідності її струмоведучих частин та за умови $U \equiv E$ і $I \equiv H$, її миттєве значення, як значення повної потужності визначається за формулою, кВА:

$$s = u \cdot i, \quad (1)$$

де u та i є функціями аргументу ωt , од.

Після відомого математичного перетворення створюється формула для визначення розрахункового значення повної потужності будь-якого електромагнітного поля, яку можна вважати його математичною моделлю, кВА:

$$\begin{aligned} S_p &= U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= U \cdot I \cos \varphi - U \cdot I \cos(2\omega t - \varphi) = P \mp J \cdot Q, \end{aligned} \quad (2)$$

де U_m — амплітудне значення напруги, кВ; I_m — амплітудне значення струму провідності, А; U — діюче значення

напруги, кВ; I — діюче значення струму провідності, А; φ — кут зсуву фаз між синусоїдальними напругою і струмом провідності струмоведучих частин ЕЕС, град.

Як можна бачити, перша складова рівняння (2) не залежить від частоти напруги і струму провідності струмоведучих частин електропередачі. Її називають активною потужністю і позначають літерою P , кВт. Друга складова цього рівняння змінюється з подвійною частотою за період зміни синусоїдальних напруги і струму провідності струмоведучих частин електропередачі, є її реактивною потужністю і позначається літерою Q , квар. При цьому, векторний добуток має свідчити про те, що між P та Q існує кут зсуву значень $\varphi = \pm 90^\circ$.

Аналогічний підхід до математичної моделі електромагнітних полів елементів має місце і в роботах [5–7].

Таку математичну модель електромагнітного поля будь-якого елемента ЕЕС, розроблену в математичному середовищі MATHCAD, наведено на рис. 1.

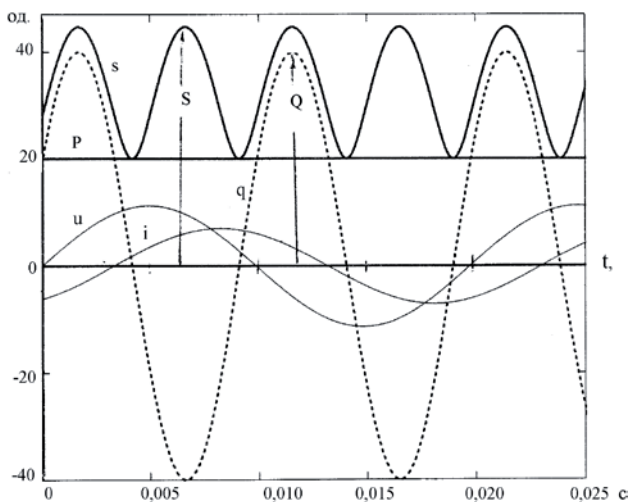


Рис. 1. Математична модель електропередачі

Як можна бачити, мають місце такі періоди часу, за якого повна потужність електромагнітного поля переходить через нульові значення і змінює напрям.

Автори статті проаналізували для своєї роботи дослідження, присвячені моделюванню енергії електромагнітного поля ЕЕС [8–11].

3. Об'єкт, мета і задачі дослідження

Об'єкт дослідження — електропередача (сукупність електроустановок для передачі споживачам електричної енергії), як товарної продукції.

Метою даної роботи є розроблення комп'ютерного варіанта реально-математичної моделі електропередачі, що відповідає математиці рівняння (2) і спирається на реальну фізику процесу передавання споживачам електричної енергії. Для цього необхідно розробити науково обгрунтовану методику проведення розрахунків нормального режиму навантаження електропередачі, що спирається на фізику її функціонування.

4. Результати дослідження процесу електропередавання

Згадану вище модель створено в середовищі MATHCAD за умови діючого значення напруги $U = 8$ од. і діючого

струму провідності електропередачі $I = 5$ од. Результати її застосування до рівняння (2), наведено на рис. 1.

Як можна бачити, повна потужність електропередачі S — це хвиля енергії поляризації діелектричного середовища електропередачі, що біжить від її початку до кінця (до споживачів електроенергії), а реактивна потужність Q — амплітуда хвилі потужності поляризації згаданого середовища у поперечному напрямку до напрямку електропередачі. Таким чином, у якості розрахункового значення реактивної потужності математична модель електропередачі, замість діючого значення, приймає амплітудне її значення. За синусоїдального характеру її зміни таке перебільшення складає величину $\sqrt{2}$, що призводить до значного завищення результатів розрахунків повного навантаження, кВА:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \tag{3}$$

де P_p — розрахункове значення активної потужності електропередачі, кВт; Q_p — розрахункове значення реактивної потужності електропередачі, квар.

Як відомо з [3, 8–10], фізично, діелектричне середовище електропередачі — це пружина, яка працює одночасно у двох напрямках, відносно до напрямку передавання енергії: уздовж і поперек нього. Вважається, що напруга (за допомогою електричної ємності струмоведучих частин), поляризує, стискає його, а струм провідності (за допомогою індуктивності струмоведучих частин), теж поляризує його, розтягує. При цьому, кругові орбіти його атомів набувають форми овалу і у ньому створюються струми провідності, як у поздовжньому, так і у поперечному напрямках, відносно напрямку передавання енергії. Таку їх дію демонструє рис. 2, який свідчить про домінуючу перевагу струму провідності і їх індуктивності.

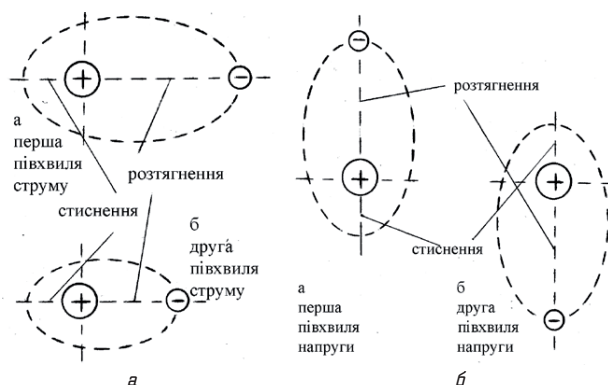


Рис. 2. Поляризація діелектричного середовища електропередачі: а — поздовжня поляризація; б — поперечна поляризація

З урахуванням фізики створення електромагнітного поля, математику рівняння (2), як математичну модель будь-якого елемента ЕЕС, графічно, можна представити у вигляді рис. 3.

Якщо прийняти до уваги, що поляризоване діелектричне середовище електропередачі це пружина, і те, що енергію справжньої пружини у розтягнутому її стані вважають споживленою і позначають знаком плюс (+), то робочими квадрантами електромагнітного поля електропередачі є квадранти 1 та 2.

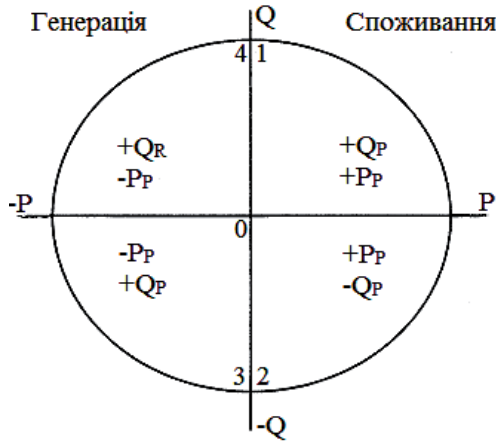


Рис. 3. Реально-математична модель електромагнітного поля

При цьому, можна бачити:

Не залежно від стану поляризованого діелектричного середовища у поздовжньому напрямку електропередачі (розтягнене чи стиснене) енергія завжди передається споживачам. Це активна складова енергії поля електропередачі – P , яка є незмінною і має розглядатися як діюча складова його енергії.

Стан поляризованого діелектричного середовища у її поперечному напрямку може бути розтягнутим (у більшості випадків), або стисненим (у випадку, коли синусоїдальний струм навантаження електропередачі випереджає її синусоїдальну напругу.

Уявлення про електромагнітне поле електропередачі пояснює рис. 4, де показана заступна схема електропередачі елементарної довжини, струмоведучі частини якої реально володіють активним опором струмоведучих частин ∂r та ємністю ∂c , яку поділено, умовно, на дві частини. При цьому, фізично, це реальна спроможність струмоведучих частин до періодичного накопичення електричного заряду на їх поверхні під дією електронів їх струму провідності.

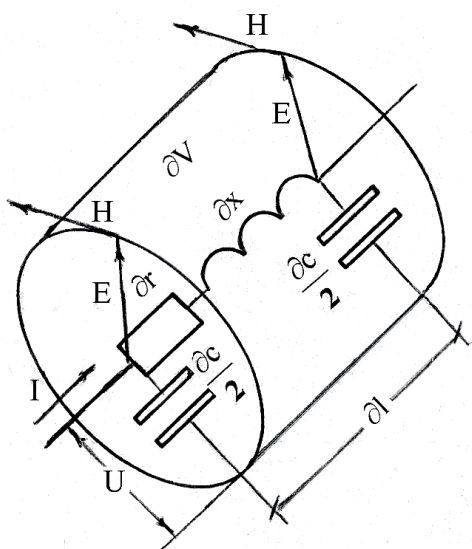


Рис. 4. Заступна схема елемента реальної електропередачі

Активний опір струмоведучих частин електропередачі ∂r реально існує. Це опір, що створюється протидією електронів, що обертаються у атомів вузлів кристаліч-

ної решітки провідників, поступальному руху вільних електронів, які створюють струм провідності струмоведучих частин, Ом.

Реактивного опору провідників ∂x , фізично, не існує. Математично, його визначають за формулою, Ом:

$$\partial x = \omega \partial L, \tag{4}$$

де ω – кутова частота зміни напруги, яка за номінальної частоти ЕЕС 50 Гц приймається на рівні, 1/с:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314. \tag{5}$$

Фізична сутність існування індуктивності струмоведучих частин електропередачі L , в формулі (4), можна пояснити спіральною формою руху електронів струму провідності провідників (рис. 5).

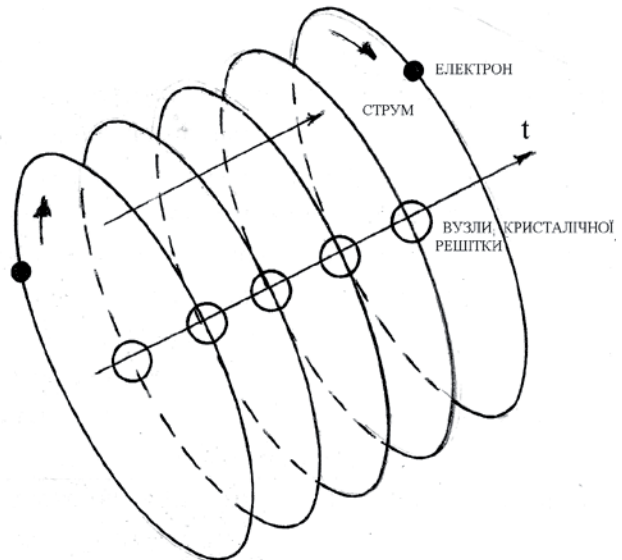


Рис. 5. Можлива траєкторія руху електронів струму провідності

Зважаючи на те, що індуктивність електропередачі завжди переважає над її ємністю, синусоїдальний струм провідності (струм реального навантаження), завжди, відстає за фазою від її синусоїдальної напруги. Ступінь такого відставання можна зменшити, застосувавши в СЕП споживачів електроенергії пристрої компенсації їх власного реактивного навантаження (ПКРН). У якості таких пристроїв можуть слугувати електроприймачі (ЕП), синусоїдальний струм провідності навантаження яких випереджає за фазою синусоїдальну напругу на їх затискачах. Такими ЕП на практиці застосовують синхронні двигуни (СД), конденсаторні установки (КУ) та статичні компенсатори (СТК), як спеціальні напівпровідникові перетворювачі.

На рис. 6 наведено векторну діаграму потужностей електропередачі, що спирається на реальну фізику її функціонування, яку представлено вище.

З урахуванням такої діаграми, на рис. 7, а наведено реально-математичну модель реактивного навантаження електропередачі, а на рис. 7, б реально-математичну модель повного її навантаження, які відповідають математиці рівняння (2) і спираються на фізику технології передавання електроенергії, викладену вище.

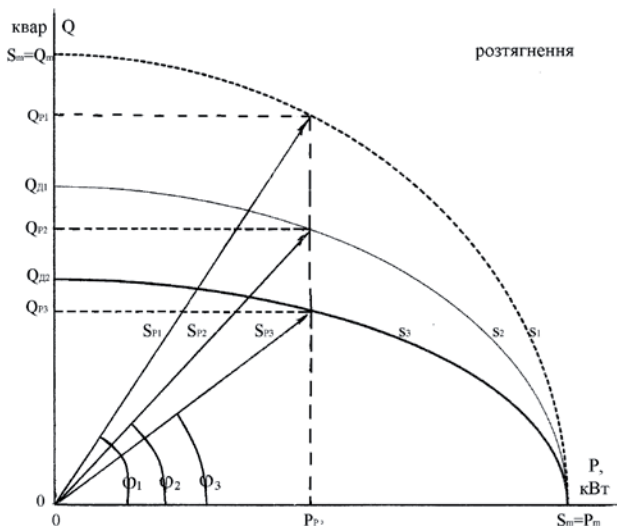


Рис. 6. Реальна векторна діаграма електропередачі

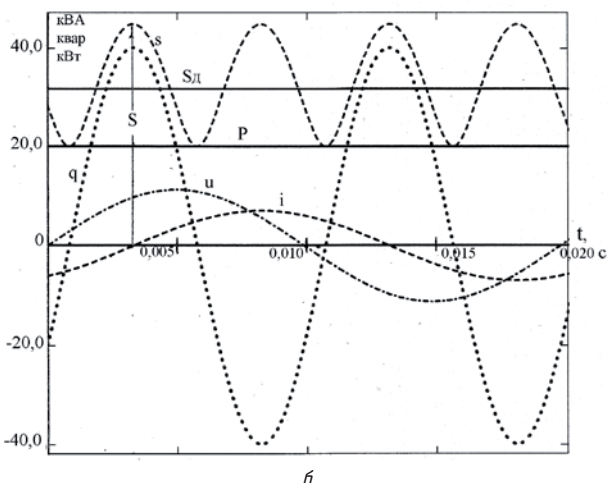
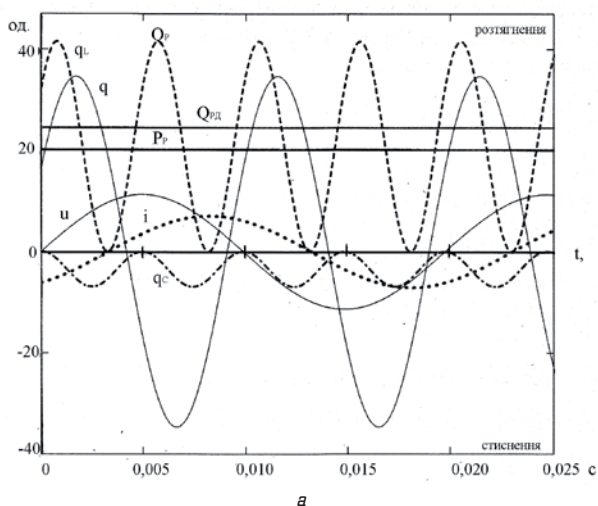


Рис. 7. Реально-математичні моделі електропередачі: а — реактивне навантаження; б — повне навантаження

Зважаючи на економічний збиток електропостачальних організацій (ЕО) від реактивного навантаження споживачів, в нормативному документі [11], що діє в Україні накладено обмеження на величину коефіцієнта реактивної потужності СЕП конкретних споживачів

чів електроенергії з вимогою $\text{tg}\phi=0,25$ в. о. Але не конкретизовано — це його поточне чи діюче значення.

5. Обговорення результатів дослідження фізики електропередачі

Проведені дослідження свідчать про те, що основну роль при створенні електромагнітного поля електропередачі відіграє напруга. Достеменно відомо — її поставляє споживачам електропередача. Якщо прийняти до уваги те, що напруга — наслідок роботи генераторів ЕЕС, то напругу можна вважати потенційною формою електроенергії. Разом зі струмом навантаження споживача, створеним цією напругою, відбувається поляризація діелектричного середовища електропередачі, внаслідок чого і створюється електромагнітне поле, яке перетворює потенційну форму електроенергії у кінетичну, яка може виконувати корисну роботу.

Для цього напруга стискає електрично пружне діелектричне середовище електропередачі, а струм навантаження його розтягує. При цьому створюється хвиля енергії поляризації, що біжить від початку електропередачі до її кінця. Тому енергію електропередачі можна, умовно, розкласти у двох напрямках, відносно напрямку електропередавання: поздовжня складова (активна енергія) передається споживачам і споживається (виконує корисну роботу); поперечна складова (реактивна енергія) — це внутрішня енергія електропередачі. Двічі, за період зміни напруги, вона коливається від нуля до максимуму, періодично збільшуючи струм електропередачі. При цьому збільшуються активні втрати електропередачі, зменшується її пропускна спроможність і суттєво змінюється рівень напруги її кінця.

Математична модель електропередачі у якості розрахункового значення реально неіснуючої реактивної електроенергії сприймає її амплітудне значення, що суттєво впливає на розрахунки, пов'язані з визначенням економічності електропередавання. Очевидно, що реально, впливає на такі розрахунки діюче значення реактивного навантаження споживачів, яке повинно бути узаконене в нормативних документах на державному рівні.

Реально-математичне моделювання електропередачі є продовженням наукової роботи авторів і має бути продовженим у напрямку його удосконалення для визначення реальної вартості електроенергії для її споживачів у залежності від принципової схеми їх приєднання до системних електричних мереж з номінальною напругою 110 кВ, які вважаються прилавком енергоринку України.

6. Висновки

1. Математична модель електропередачі у якості розрахункового значення її реактивної потужності розуміє її амплітудне значення Q_p , квар.
2. Спираючись на фізику реального процесу електропередавання у якості розрахункового реактивного навантаження електропередачі необхідно приймати діюче значення її реактивного навантаження, яке становить величину $Q_{PД} = Q_p / \sqrt{2}$, квар.
3. В нормативних документах України, що регламентують потужність реактивного навантаження електропередачі, наголосити на тому, що директивне значення коефіцієнта її реактивної потужності $\text{tg}\phi_{Д} = 0,25$ — це його діюче значення, в. о.

Література

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники [Текст]: учеб. / Л. А. Бессонов. — 6-е изд. — М.: Высш. школа, 1973. — 752 с.
2. СОУ-Н МПЕ 40.1.20.510.:2006. Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача (основного споживача та субспоживача) [Текст]. — Київ, 2006. — 48 с.
3. Ландау Л. Д. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика [Текст] / Л. Д. Ландау, А. И. Ахиезер, Е. М. Лифшиц. — М.: Наука; Главная редакция физико-математической литературы, 1969. — 399 с.
4. Дорошенко, О. І. Щодо питання сутності реактивної електроенергії [Текст] / О. І. Дорошенко // Енергетика та електрифікація. — 2007. — № 6. — С. 65–68.
5. Ионкин, П. А. Теоретические основы электротехники, Основы теории линейных цепей [Текст] / П. А. Ионкин. — М.: Высшая школа, 1976. — Т. 1. — 544 с.
6. Чабан, В. Й. Математичне моделювання електромагнітних процесів [Текст] / В. Й. Чабан. — К.: НМК ВО, 1992. — 390 с.
7. Кириленко, О. В. Математичне моделювання в електроенергетиці [Текст]: підручник / О. В. Кириленко, М. С. Сегеда, О. Ф. Буткевич, Т. А. Мазур. — Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. — 608 с.
8. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы [Текст]: учеб. / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, В. М. Тареев. — Л.: Энергоатомиздат., 1985. — 7-е изд. — 304 с.
9. Дорошенко, О. І. Про фізику електромагнітного поля електроенергетичної системи [Текст] / О. І. Дорошенко // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів, Кременчук, 2–4 листопада 2012 р. — С. 33–35.
10. Дорошенко, О. І. Про математику і фізику електропередачі [Текст] / О. І. Дорошенко // Матеріали X Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Новини наукової думки», 22–30 жовтня 2014 р., Прага. — С. 15–22.
11. Методика визначення нерационального (неэффективного) використання паливно-енергетичних ресурсів [Текст] / Національне агентство України з питань забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів. — Київ, 2009. — 117 с.

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Опираясь на физику нормального режима работы электроэнергетических систем, в статье предлагается новый научно-методический подход к определению понятия реактивной мощности электропередачи до систем электроснабжения промышленных и приравненных к ним потребителей. Доказано, что в качестве ее реактивного расчетного значения, вместо амплитудного, необходимо принимать действующее значение.

Ключевые слова: электроснабжение, моделирование электропередачи, электроэнергия, активная электроэнергия, реактивная электроэнергия, полная электроэнергия.

Дорошенко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електропостачання та енергоменеджменту, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: dai1938@yandex.ua.

Романюк Олена Вікторівна, кафедра електропостачання та енергоменеджменту, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: romanjukhelen@mail.ru.

Борисенко Світлана Олександрівна, керівник проектної групи, ВТВ ПАТ «Одесаобленерго», Одеса, Україна, e-mail: sab1975@list.ru.

Дорошенко Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент, кафедра электроснабжения и энергоменеджмента, Одесский национальный политехнический университет, Украина.

Романюк Елена Викторовна, кафедра электроснабжения и энергоменеджмента, Одесский национальный политехнический университет, Украина.

Борисенко Светлана Александровна, руководитель проектной группы, ПТО ЗАО «Одесаобленерго», Одесса, Украина.

Doroshenko Oleksandr, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: dai1938@yandex.ua.

Romaniuk Elena, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: romanjukhelen@mail.ru.

Borisenko Svitlana, VET CJSC «Odesaoblenergo», Odessa, Ukraine, e-mail: sab1975@list.ru.

УДК 621.6

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.47783

**Иванов В. Б.,
Ситас В. И.,
Рихтер М.**

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ГИДРОМУФТ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

В статье рассмотрены вопросы эффективности применения регулируемых гидродинамических приводов для управления производительностью центробежных насосных агрегатов. Приведены примеры расчетов экономии электроэнергии для насосов различной мощности. Проанализированы факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на сроки окупаемости при внедрении данной технологии.

Ключевые слова: гидродинамический регулируемый привод, гидромуфта, центробежный насос, энергоэффективность, дроссельное регулирование, потребляемая мощность.

1. Введение

Центробежные насосы являются одним из наиболее энергоемких видов оборудования, широко представленным в промышленности, энергетике, коммунальном

хозяйстве. Регулирование производительности центробежных насосных агрегатов имеет огромный потенциал экономии электроэнергии. По данным Европейской ассоциации производителей насосного оборудования возможное снижение энергопотребления за счет регулирования