

УДК 621.371:621.311.4

О. І. Дорошенко, канд. техн. наук,
О. В. Панчишин, І. І. Петренко

ПРО РЕАКТИВНЕ НАВАНТАЖЕННЯ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Анотація. Запропоновано методику визначення загальних активних втрат синхронного двигуна від його реактивної потужності, за допомогою якої можна визначити економічне значення коефіцієнта реактивної потужності синхронного двигуна. В роботі наводяться розрахунки для конкретного синхронного двигуна у залежності від коефіцієнта його активного навантаження.

Ключові слова: синхронний двигун, реактивна енергія, економічне реактивне навантаження двигуна

A. I. Doroshenko, PhD.,
A. V. Panchyshyn, I. I. Petrenko

ON REACTIVE LOAD SYNCHRONOUS MOTORS

Annotation. A method of determining the total active loss synchronous motor from its reactive power, which can be used to determine the economic value of the coefficient of reactive power synchronous motor. The work presents the calculations for a specific synchronous motor, depending on the ratio of its active load.

Keywords: synchronous motor, reactive energy, economic jet engine load

A. I. Doroshenko, канд. техн. наук,
О. В. Панчишин, И. И. Петренко

О РЕАКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. Предлагается методика определения общих активных потерь синхронного двигателя от его реактивной мощности, с помощью которой можно определить экономическое значение коэффициента реактивно мощности синхронного двигателя. В работе приводятся расчеты для конкретного синхронного двигателя в зависимости от коэффициента его активной нагрузки.

Ключевые слова: синхронный двигатель, реактивная энергия, экономическая реактивная нагрузка двигателя

Вступ. Спираючись на хибне положення про те, що реактивна електроенергія є специфічним видом електроенергії (ЕЕ) електроенергетичних систем (ЕЕС) і може передаватись до споживачів і від них за допомогою струмоведучих частин, у практиці досліджень режимів навантаження таких систем широко використовують розуміння її «джерел» та «споживачів» [1].

Одним з видів таких «джерел» реактивної ЕЕ вважаються синхронні двигуни (СД), які застосовуються в системах електропостачання за специфікою технологічного виробництва споживачами ЕЕ [2, 3]. При цьому вважається, що має місце економія коштів за рахунок зменшення капітальних витрат споживача на «джерела» реактивної ЕЕ.

Мета цієї роботи – визначення меж економічності конкретного СД в межах конкретної ЕЕС.

Аналіз відомих рішень

Як відомо з [4], носієм енергії в ЕЕС є її електромагнітне поле:

«...Электромагнитная энергия от места ее генерирования передается к месту потребления по диэлектрику (провода же в линиях передачи выполняют двоякую роль: они являются каналами, по которым проходит ток, и организаторами структуры поля в диэлектрике)...».

За твердженням [5], ЕЕ фізично є енергією електромагнітного поля ЕЕС, яка може існувати тільки лише в її електрично пружному діелектричному середовищі.

Таке можливе через те, що дією напруги і струму провідності струмоведучих частин ЕЕС відбувається поляризація найменших фізичних частинок, які у нормальному становищі себе не проявляють ніяким чином і які автори [6] називають фітонами (від поняття фізичного вакууму). За їх версією, густина фізичного вакууму дуже мала і не перебільшує величину 10^{-18} г/см³. Таким чином, фітони можуть бути універсальним будівельним матеріалом, з якого побудовані атоми простих і молекули складних речовин, матерією.

Діючи на фітони діелектричного середовища, що оточує струмоведучі частини ЕЕС (за допомогою їх ємності) напруга стискає згадане середовище, а струм провідності (за допомогою індуктивності) розтягує, розтягає його у тих же напрямках.

Спираючись на теорему Пойтинга (за умови $E \equiv U$ і $H \equiv I$), для синусоїдальної напруги і струму провідності, що відстає на фазовий кут φ , можна записати,

$$s = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = \\ = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi), \quad (1)$$

де U_m , U – амплітудне і діюче значення синусоїдальної напруги, що змінюється з кутовою частотою ωt , V ; I_m , I – амплітудне і діюче значення синусоїдального струму провідності, який відстає від напруги за фазою на кут φ .

Складові рівняння (1) наведені на рис. 1.

© Дорошенко О.І., Панчишин О.В.,
Петренко І.І., 2014

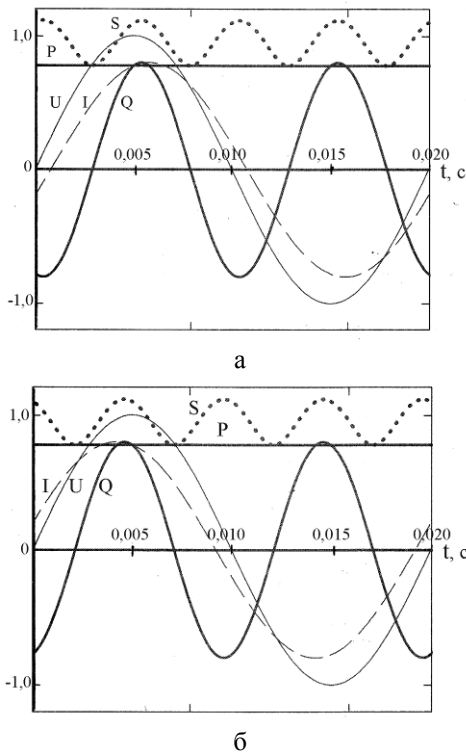


Рис. 1. Складові потужності електропередачі

За даним [7] електромагнітне поле ЕЕС необхідно розглядати як плоско паралельне. При цьому можна бачити, що для відстаючого від напруги струму провідності (рис. 1, а) і для струму провідності, який випереджає її (рис. 1, б), активна складова величини потужності поля – P незмінна за часом і передається до споживача, а реактивна складова – Q двічі за період змінного струму синусоїдально змінюється від нуля до амплітудного значення. При цьому в струмоведучих частинах ЕЕС створюється додатковий струм самоіндукції, що має напрямок протилежний до струму провідності від джерела живлення. Такий струм одержав назву реактивного, а складова енергії електромагнітного поля, що його створює – назву реактивної ЕЕ.

Таким чином це внутрішня частина енергії ЕЕС, яка ні до споживача, ні від нього, передаватись не може, тим більше бути штучно згенерованою.

Оскільки синхронний двигун нормально працює в режимі перезбудження, то струм його статора випереджає напругу на фазовий кут φ , величина якого визначається величиною електрорушійної сили (ЕРС) двигуна, яка, у свою чергу, залежить від величини струму збудження.

Як можна бачити з векторної діаграми (рис.2), збільшення ЕРС двигуна, за незмінного активного навантаження, від OC_2 до OC_1 збільшує його реактивну потужність від AB_2 до AB_1 і зменшує кут δ_2 до δ_1 , що благотворно впливає на його статичну стійкість. Але при цьому зростає повна потужність двигуна від AC_2 до AC_1 , що може його пошкодити через перенавантаження обмотки статора за рахунок активних втрат у ньому.

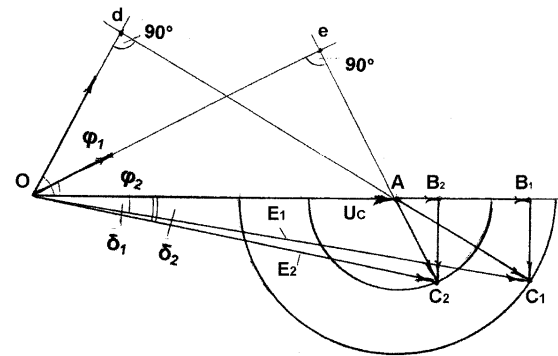


Рис. 2. Векторна діаграма синхронного двигуна

Результати дослідження

Як відомо, величину активних втрат будь-якого елемента ЕЕС можна визначити за відомою формулою, кВт

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_{НОМ}^2} \cdot R \cdot 10^{-3} = \frac{P^2}{U^2} R \cdot 10^{-3} + \frac{Q^2}{U^2} R \cdot 10^{-3} = \Delta P_p + \Delta P_Q = \Delta P_p (1 + tg\varphi^2), \quad (2)$$

де P – середня активна потужність елемента, кВт;
 Q – середня реактивна потужність елемента, квар;
 $U_{НОМ}$ – номінальна напруга електричної мережі, кВ;
 R – активний опір елемента, приведений до номінальної напруги, Ом; ΔP_p – активні втрати тільки від активного навантаження, кВт; ΔP_Q – активні втрати тільки від реактивного навантаження, кВт; $tg\varphi$ – розрахункове значення коефіцієнта реактивної потужності елемента.

Якщо у якості базового значення прийняти ΔP_p , то рівняння (2) у відносних одиницях набуває виду

$$\Delta P^* = (1 + tg\varphi^2). \quad (3)$$

Як відомо з [1], активні втрати СД від його реактивного навантаження можна визначити за формулою, кВт

$$\Delta P_{QД} = A \cdot \frac{Q_{СД}^2}{Q_{НОМ.СД}^2} + B \cdot \frac{Q_{СД}}{Q_{НОМ.СД}}, \quad (4)$$

де $Q_{СД}$ – реактивне навантаження СД, квар;
 $Q_{НОМ.СД}$ – номінальна реактивна потужність СД, квар; A, B – розрахункові коефіцієнти, числові значення яких наведено у додатках до [1], кВт/квар.

За аналогією в [6], зважаючи на прийняті умови:

$$\Delta P_p \equiv I, \quad (5)$$

$$\Delta P_Q \equiv tg\varphi^2. \quad (6)$$

Повні активні втрати в СД можна визначити за формулою, кВт

$$\Delta P_{\Sigma СД} = \left(\frac{I}{tg\varphi_{СД}^2} + tg\varphi_{СД}^2 \right) \cdot \Delta P_{QД}, \quad (7)$$

де $\Delta P_{QД}$ – активні втрати в СД тільки від його реактивного навантаження, що визначаються за формулою (4), кВт.

У якості прикладу розглянемо СД, параметри якого наведено на рис. 3. Його повна потужність

$$S_{НОМ.СД} = \sqrt{400^2 + 209^2} = 451,310 \text{ кВА.}$$

Зважаючи на необхідний запас статичної стійкості, коефіцієнт його навантаження приймається на рівні $\beta_{СД} = 0,92$. При цьому активне навантаження СД

$$P_{СД} = \beta_{СД} P_{НОМ.СД} = 0,92 \cdot 400 = 368 \text{ кВт.}$$

За умови неможливості перевантаження статора СД його максимальне реактивне навантаження не може перебільшувати значення

$$Q_{МАХ.СД} = \sqrt{S_{НОМ.СД}^2 - P_{СД}^2} = \sqrt{451,310^2 - 368^2} = 261,260 \text{ квар.}$$

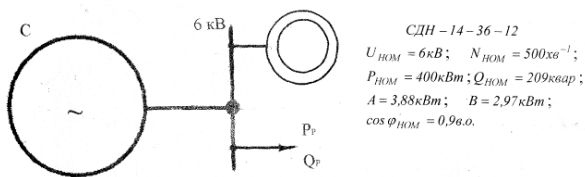


Рис. 3. Номінальні параметри синхронного двигуна

Як можна бачити з рис.1, це амплітудне значення реактивної потужності, що змінюється за синусоїдальним законом. Тому

$$Q_{СД} = \frac{Q_{МАХ.СД}}{\sqrt{2}} = \frac{261,260}{\sqrt{2}} = 184,739 \text{ квар.}$$

Активні втрати СД тільки від його реактивного навантаження визначаються за формулою (4)

$$\Delta P_{QД} = 3,88 \cdot \frac{184,739^2}{209^2} + 2,97 \cdot \frac{184,739}{209} = 5,657 \text{ кВт.}$$

Загальні активні втрати СД визначаються за формулою (7)

$$\Delta P_{СД} = \left(\frac{1}{0,484^2} + 0,484^2 \right) \cdot 5,657 = 25,474 \text{ кВт.}$$

Залежність $P_{СД} = f(\text{tg} \varphi_{СД})$, $Q_{СД} = f(\text{tg} \varphi_{СД})$ та $S_{СД} = f(\text{tg} \varphi_{СД})$ наведені на рис. 4.

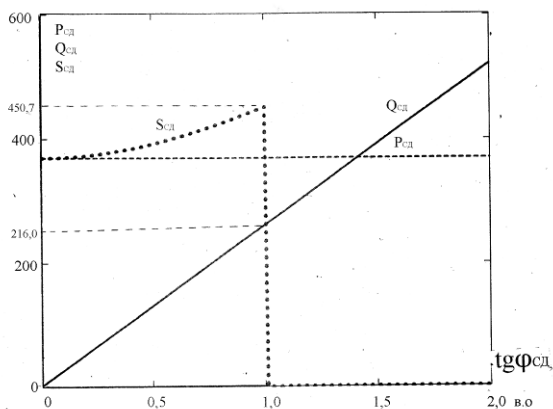


Рис. 4. Залежність навантаження синхронного двигуна за умови $\beta_{СД} = 0,92$

Таким чином, за умови максимального повного навантаження СД, яке не перебільшує величину 450,706 кВА, його реактивне навантаження складає 215,979 квар. При цьому коефіцієнт реактивної потужності складає величину $\text{tg} \varphi_{СД} = 1,0$.

Залежність активних втрат СД від його реактивного і повного навантаження представлено на рис.5. З нього виходить що, мінімальні активні втрати СД від його реактивного навантаження мають місце за умови $\text{tg} \varphi_{СД} = 0,82$, а максимальні – при $\text{tg} \varphi_{СД} = 1,0$.

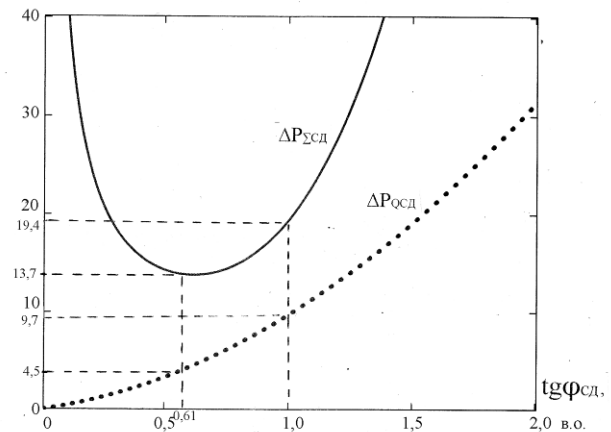


Рис. 5. Втрати СД від його реактивного навантаження за умови $\beta_{СД} = 0,92$

Аналогічні розрахунки проведені для різних значень $\beta_{СД}$ цього двигуна. Їх результати наведені в табл.1.

1. Реактивне навантаження СД 6 кВ

Параметр СД	$\beta_{СД}$, в.о.			
	0,92	0,80	0,50	0,25
$P_{СД}$, кВт	368,0	320,0	200,0	100,0
$Q_{СД}$, квар	216,0	198,4	132,0	96,0
$\text{tg} \varphi_{СД}$, в.о.	-0,61	-0,62	-0,66	-0,69
ΔP_Q , кВт	4,494	3,742	2,100	0,905
ΔP_{Σ} , кВт	13,749	11,172	5,736	2,331
ΔP_D , кВт/квар	0,0866	0,0796	0,0614	0,0343

Економічність компенсації реактивного навантаження споживача за рахунок СД можна визначити за величиною питомих активних втрат від його реактивного навантаження за формулою, кВт/квар

$$\Delta p_{qCC} = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{Q_{СД}}. \quad (8)$$

Як можна бачити, зі збільшенням рівня активного навантаження СД його економічна ефективність у якості пристрою для компенсації реактивного навантаження споживача зменшується. За даними [7], активне навантаження СД не повинно перебільшувати значення $\beta_{СД} \leq 0,92$.

Крім того, ємнісний струм статора СД збільшує рівень перенапруги електричних мереж з ізо-

льованою нейтраллю за однофазного замикання на землю, що вимагає суттєвого зменшення реактивного навантаження СД за такого режиму або їх вимкнення.

Такої вади нема у СД з номінальною напругою 0,38 кВ. Параметри режиму навантаження такого двигуна аналогічної потужності наведені в табл.2.

2. Реактивне навантаження СД 0,38 кВ

Параметр	$\beta_{СД}$, в.о.			
	0,92	0,80	0,50	0,25
СД	0,92	0,80	0,50	0,25
$P_{СД}$, кВт	368,0	320,0	200,0	100,0
$Q_{СД}$, квар	239,2	211,2	138,0	71,0
$tg\phi_{СД}$, в.о.	-0,65	-0,66	-0,69	-0,71
ΔP_Q , кВт	3,848	3,244	1,158	0,833
ΔP_{Σ} , кВт	10,733	8,861	4,787	2,071
$\Delta p_{Д}$, кВт/квар	0,0635	0,0593	0,0491	0,0412

Таким чином, що такі СД більш економні як пристрої компенсації реактивного навантаження, ніж перші. Але, як відомо з [11], їх питомі активні втрати від реактивного навантаження значно перебільшують такі втрати в конденсаторних установках з номінальною напругою 0,8 кВ, які не перебільшують величину 0,00025 кВт/квар.

Висновки

1. Реактивна енергія синхронного двигуна фізично є складовою енергії його електромагнітного поля (його внутрішньої енергії), яка суттєво збільшує активні втрати в струмоведучих частинах двигуна.

2. Реактивну потужність синхронного двигуна необхідно регулювати в межах, за яких його повна потужність не перебільшує її номінальне значення.

3. Оптимальним коефіцієнтом реактивної потужності синхронного двигуна необхідно вважати таке його значення, при якому загальні активні втрати двигуна є мінімальними.

4. В режимі однофазного замикання на землю в електричних мережах 6(10) кВ реактивне навантаження синхронних двигунів в системах електропостачання споживачів необхідно обмежувати до величини коефіцієнта запасу їх статичної стійкості, що складає величину не меншу ніж 8 %, або відмикати, з наступним запуском після усунення замикання.

5. Питомі активні втрати СД з номінальною напругою 0,38 кВ від його реактивного навантаження значно менші від таких для СД з номінальною напругою 6 кВ.

6. Незважаючи на те, що питомі активні втрати СД з номінальною напругою 0,38 кВ значно більші від таких для конденсаторних установок 0,38 кВ, їх доцільно застосовувати для плавного регулювання реактивного навантаження системи електропостачання споживача, якщо вони застосовуються за технологією виробництва такого споживача ЕЕ.

Список використаної літератури

1. 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). – 48 с.

2. Омельчук А. О. Щодо пріоритетного використання засобів компенсації реактивної потужності. / А. О. Омельчук, В. В. Мозирський, В. С. Трондюк. Енергетика та електрифікація. – 2006. – № 4. – С. 27 – 31.

3. Рогальський Б. С. Використання синхронних двигунів для забезпечення технічних значень вхідних реактивних потужностей, заданих енергопостачальною компанією / Б. С. Рогальський, Г. Б. Завальнюк, М. В. Кузьменко, Ю. В. Грицюк. Промелектро. – 2006. – № 6. – С. 54 – 58.

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

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

6. Акимов А. Е. Модели поляризованных состояний физического вакуума и торсионных полей / А. Е. Акимов, В. Я. Тарасенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1992. – № 3. – С. 13 – 23.

7. Асин И. М. Расчеты электромагнитных полей (плоскопараллельное поле) / И. М. Асин. – Ленинград : Издание ВЭТА. – 1939. – 161 с.

8. Дорошенко О. І. Щодо «переваги» застосування синхронних двигунів, як джерел реактивної потужності / О. І. Дорошенко // Промелектро. – 2008. – № 6. – С. 17 – 20.

9. Дорошенко О. І. Щодо питання «економічності» економічного еквівалента реактивної потужності / Дорошенко О. І. // Проблеми енергоресурсо збереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук : КрНУ. – Вип. 1/2014 (2). – С. 249 – 251.

10. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. / И. А. Сыромятников. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 527 с.

11. Зубюк Ю. П. Сучасні конденсатори в системах електропостачання / Ю. П. Зубюк // Промелектро. – 2004. – № 6. – С. 53 – 55

Отримано 20.06.2014

References

1. SOU – N MPE 40.1.20.510.:2006. Method of determining Economically Reasonable Amounts of Reactive Power Compensation, Flowing between the Electric Networks of Electricity Transmission and the Consumer

(the Main user and Auspicate)]. – Kiev, Ukraine, 48 p. (In Ukrainian).

2. Omelchuk A.O., Mozur V.V., and Trondiuk B.S. Shhodo priorityetnogo vykorystannja zasobiv kompensacii' reaktyvnoi' potuzhnosti [Regarding the Priority of use of Means of Reactive Power Compensation], (2006), *Energetic and Electrification*, No. 4, pp. 27 – 31 (In Ukrainian).

3. Rogalsky B.S., Zavalniuk G.B., Kuzmenko M.B., and Gritsiuk J.V. Vykorystannja synhronnyh dvyguniv dlja zabezpechennja tehnicnyh znachen' vhidnyh reaktyvnyh potuzhnostej, zadanyh energopostachal'noju kompanijeju [The use Synchronous Motors to Provide Technical input Reactive Power, Specified by the Energy Supplying Company], (2006), *Promelectro*, No. 6, pp. 54 – 58 (In Ukrainian).

4. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical Foundations of Electrical Engineering], (1973), Label show Ed. 6-that is, *Textbook for Student's Energy and Electrotechnics Universities*, Moscow, Russian Federation, *The High School*, 752 p. (In Russian).

5. Landau L.D., Akhieser A.I., and Lifshits E.M. Kurs obshchei fiziki. Mekhanika i molekulyarnaya fizika [Course of General Physics. Mechanics and Molecular Physics], (1960), Moscow, Russian Federation, *Izd. "Skience". Editorial of Physic-Mathematical Literature*, 399 p. (In Russian).

6. Akimov A.E., and Tarasenko V.E. Modeli polyarizovannykh sostoyanii fizicheskogo vakuuma i torsionnykh polei [Model of the Polarized States of Physical Vacuum and Torsion Fields], (1992), *Isvestia of Higher Schools. Physics*, No. 3, pp. 13 – 23 (In Russian).

7. Asin I.M. Raschety elektromagnitnykh polei (ploskoparallel'noe pole [Calculations of Electromagnetic Fields (Plane-Parallel Floor)], (1939), Leningrad, Russian Federation, *Izдание VETA*, 161 p. (In Russian).

8. A.I. Doroshenko, Shhodo «perevagy» zastosuvannya synhronnyh dvyguniv, jak dzherel reaktyvnoi' potuzhnosti [As for the “Benefits” and Nationally Synchronous Motors as Sources of Reactive Power], (2008), *Promelectro*, No. 6, pp.17 – 20 (In Russian).

9. Doroshenko A.I. Shhodo pytannja «ekonomichnosti» ekonomichnogo ekvivalenta reaktyvnoi' potuzhnosti [On the Issue of “Economy” the Economic Equivalent of the Reactive Power], (2014), *Problems of Energy Saving in the Electrical System. Science, Education Find Practice. Scientific Publication*, Kremenchug, Ukraine, KrNU, Vol. 1/2014 (2), pp. 249 – 251 (In Ukrainian).

10. Syromyatnikov I.A. Rezhymy raboty asynhronnyh y synhronnyh dvygatelej [Modes of Operations of Asynchronous and Synchronous Motors], (1963), Moscow, Russian Federation, *Gosenergoizdat*, 527 p. (In Russian).

11. Zubyuk Y.P. Suchasni kondensatory v systemah elektropostachannja, [Modern Capacitors in Systems the Power Supply], (2004), *Promelektro*, No. 6, pp. 53 – 55 (In Russian).



Дорошенко
Олександр Іванович,
канд. техн. наук, доц. каф. електро-
постачання та енергетичного
менеджменту Одеського нац.
політехн. ун-ту,
Тел.: 067-267-95-89.
E-mail: dai1938@yandex.net



Панчишин
Олександр Васильович,
асистент каф. електропостачання
та енергетичного менеджменту
Одеського нац. політехн. ун-ту.
Тел.: 097-822-24-42.
E-mail: Georgi4_08@mail.ru



Петренко
Ігор Ігорович,
студент-магістр каф. електропос-
тачання та енергетичного менедж-
менту Одеського нац. політехн.
ун-ту.
Тел.: 063-137-18-74.
E-mail: Datex08@mail.ru