

УДК 621.316.728

Л.Г. ЕВТУШЕНКО., магістрант, О.В. БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.  
Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського

## КОМБІНОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ З КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У ВУЗЛІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

В роботі на підставі аналізу теоретичних підходів і технічних рішень, викладених у відомих публікаціях, поставлена задача розробки схеми управління асинхронним генератором. Генератор входить до складу комплексу з автономним інверторним перетворювачем, що забезпечує підтримку реактивного струму генератора (збудження), конденсаторним накопичувачем, інвертором веденим мережею для управління віддачею активної потужності. Обґрунтовано використання мережевого перетворювача (інвертора веденого мережею) комплексу генерації енергії для управління потоком активної і неактивної складових потужності, що призводить до зниження рівня неактивної потужності у вузлі мережі. Відзначено, що отримана структура системи має певну симетрію щодо конденсаторного накопичувача, як з графічної позиції, так і з позиції напрямки перетворення енергії реактивного характеру.

**Ключові слова:** асинхронний генератор, інверторний перетворювач, регулювання активної та реактивної потужностей, p-q теорія

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами.** Асинхронні генератори є одним з різновидів механічного та електромеханічного пристрою, що перетворює енергію двигуна автономної електростанції в електричну енергію. Робота асинхронного генератора побудована на принципі обертання ротора в одному напрямку з магнітним полем, але з більшою швидкістю. В результаті на валу генератора утворюється гальмуючий момент через негативне ковзання ротора, завдяки чому і відбувається вироблення електроенергії [1].

До основних переваг асинхронних генераторів відносять низький коефіцієнт гармонік, який є одним з показників нерівномірності обертання і, як наслідок, марного нагріву машини. Так, зокрема, якщо у синхронних генераторів коефіцієнт гармонік може досягати 15 %, то у асинхронних аналогів даний показник дуже рідко перевищує 2 %. Крім цього дані рішення практично не мають обертових обмоток і електронних деталей, які, як правило, завжди першими виходять з ладу. Завдяки цьому асинхронні генератори відрізняються високою надійністю і тривалим терміном служби [2].

**Аналіз досліджень та публікацій.** Для збудження автономно працюючого АГ необхідна наявність джерела реактивної потужності - батареї конденсатора або синхронного компенсатора, підключених до обмотки статора. При цьому майже природною представляється робота АГ при надсинхронному ковзанні [2], коли швидкість обертання ротора вище швидкості обертового магнітного поля. Проте практично АГ може збуджуватися при частоті обертання ротора, значно менше синхронної, причому значення напруги і частоти струму виявляються пропорційними частоті обертання ротора, і крім того, залежними від схеми з'єднання конденсаторів [3].

В останні роки набули застосування електромашинні джерела енергії з АГ, збуджуваними за допомогою вентильних перетворювачів, наприклад, автономних інверторів напруги, або працюють в режимі самозбудження із застосуванням конденсаторів або з використанням акумуляторної батареї.

Це визначається величиною залишкової ЕРС, яка не повинна бути менше порогових напруг елементів перетворювача [4,5]. Обов'язковою умовою сталого самозбудження АГ є певна швидкість зниження частоти імпульсів управління, що подаються на транзистори, при входженні в область самозбудження.

Слід зазначити, що використання інверторної схеми дозволяє підтримувати режим збудження асинхронного генератора та певний рівень віддачі активної потужності. Для віддачі енергії до мережі використовуються інвертори які веде мережа [6-8].

Наявність в структурі генеруючої установки напівпровідникових трифазних перетворювачів для організації та підтримки режиму генерації енергії до мережі я підґрунтям для вирішення задачі підвищення якості електричної енергії у вузлі до якого підключена генеруюча установка [7].

**Постановка задачі.** Розробка структури електроенергетичного комплексу з асинхронним генератором для забезпечення компенсації неактивних складових потужності вузла електричної мережі.

**Матеріали та результати дослідження.** На рис. 1 наведено блок-схему електротехнічного комплексу. Первинний двигун 1 розкручує ротор асинхронного генератора 4, швидкість обертання ротора контролюється датчиком швидкості 2, причому максимальна величина швидкості

обмежується за допомогою системи керування швидкістю 3, на входи якої поступають сигнали з датчика швидкості 2,  $\omega$  і заданої кутової швидкості  $\omega^{ref}$ . Електричну енергію асинхронного генератора 4 передають на генераторний перетворювач 7.

Контролюють датчиками 5 струми фаз генератора  $i_{abc,gn}$ . Координатним перетворювачем струму 17 виконують перетворення Парка

$$i_x = \frac{2}{3} \left[ i_a \cos \theta + i_b \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; i_y = \frac{2}{3} \left[ i_a \sin \theta + i_b \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right].$$

Передають струм  $i_{xy,gn}$  з координатного перетворювача струму 17 на блок керування вектором поля 22. Розраховують в системі керування швидкістю 6 електромагнітний момент асинхронного генератора  $\dot{I}_{\bar{A}}$ .

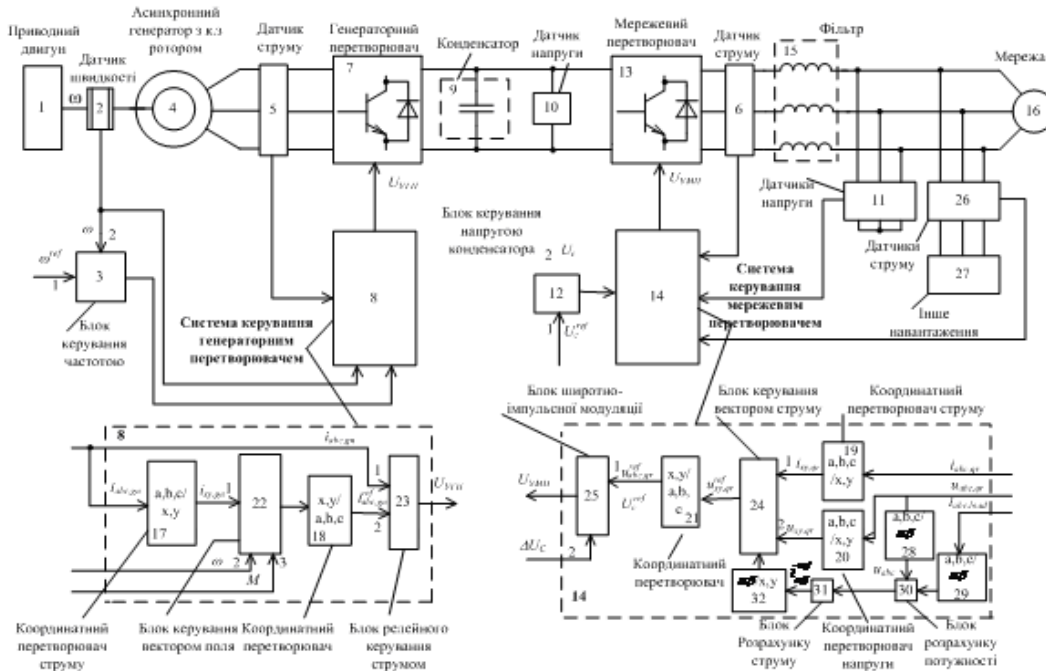


Рис. 1. Блок схема генеруючої установки з автоматичною системою

В системі керування швидкістю розраховують різницю заданої кутової швидкості  $\omega^{ref}$  та поточної кутової швидкості  $\omega$  -  $\Delta\omega = \omega^{ref} - \omega$ . Електромагнітний момент асинхронного генератора

$$\dot{I}_{\bar{A}} = k_{\omega p} \cdot \Delta\omega,$$

де  $k_{\omega p} = (JL_r k_{a\bar{a}n}) / (3z_p L_m k_{a\bar{a}o} \dot{O}_{e\bar{n}})$ ;  $J$  - момент інерції приведений до валу асинхронного генератора;  $L_r$  - індуктивність ротора;  $L_m$  - індуктивність намагнічування генератора;  $k_{a\bar{a}n}$  - коефіцієнт передачі датчика струму;  $\dot{O}_{e\bar{n}}$  - мала некомпенсована постійна часу контуру швидкості;  $z_p$  - число пар полюсів двигуна;  $k_{a\bar{a}o}$  - коефіцієнт передачі датчика швидкості.

Розраховують задану пряму проекцію вектора струму генератора за віссю  $x$  в блоці 21 покладаючи потокозчеплення ротора,  $\psi_r = const$ ,  $i_{x,gn}^{ref} = \psi_r / L_m$ . Розраховують струм намагнічування в блоці 22 за реактивною складовою струму  $i_y$ ,  $i_\mu = i_y \cdot L_m$ , ортогональну проекцію вектора струму генератора за віссю  $y$  в блоці 22

$$i_{y,gn}^{ref} = \frac{2M_{\bar{A}} L_r}{3\psi_r \cdot z_p \cdot k_r L_m}$$

Розраховують поточне положення ротору в блоці 22

$$\theta = \int (\omega_r \cdot k + L_m \cdot i_x / T_r \cdot \psi_r) dt$$

де  $\omega_r$  - частота обертання вектору потокозчеплення ротора;  $i_x$  - активна складова струму;  $k$  - коефіцієнт зв'язку струму потокозчеплення;  $T_r = L_r/R_r$  - постійна часу роторного кола.

Координатним перетворювачем 18 виконують зворотнє перетворення поточних струмів  $i_{x,gn}^{ref}$ ,  $i_{y,gn}^{ref}$

$$i_{a,gn}^{ref} = i_{x,gn}^{ref} \cos(\theta) - i_{y,gn}^{ref} \sin(\theta); i_{b,gn}^{ref} = i_{x,gn}^{ref} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) - i_{y,gn}^{ref} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}); i_{c,gn}^{ref} = -(i_{a,gn}^{ref} + i_{b,gn}^{ref}).$$

У блоці релейного керування струмом 23 розраховують різницю поточного струму  $i_{abc,gn}$  та заданого струму  $i_{abc,gn}^{ref}$  для відповідних фаз  $\Delta i = i_{abc,gn}^{ref} - i_{abc,gn}$ .

Визначають рівень вихідної напруги керування транзисторами верхнього та нижнього плеча генераторного перетворювача 7 по фазі  $a$ -

$$U_{VT,a}^{HI} = \begin{cases} 1 & \text{якщо } \Delta i > i_{band}; \\ 0 & \text{якщо } \Delta i < i_{band}; \end{cases} \quad U_{VT,a}^{LO} = \begin{cases} 1 & \text{якщо } \Delta i < -i_{band}; \\ 0 & \text{якщо } \Delta i > i_{band}. \end{cases}$$

Аналогічно визначають рівні напруги керування транзисторами верхнього та нижнього плеча генераторного перетворювача за фазами  $b$ , і  $c$ .

На генераторний перетворювач 7 від системи керування генераторним перетворювачем 8 передають напруги управління генераторним перетворювачем ( $U_{VT,a}^{HI}$ ,  $U_{VT,a}^{LO}$ ,  $U_{VT,b}^{HI}$ ,  $U_{VT,b}^{LO}$ ,  $U_{VT,c}^{HI}$ ,  $U_{VT,c}^{LO}$ ) забезпечуючи рівень реактивної потужності в генераторі, та передачу активної потужності до конденсатора 9.

Контролюють датчиком 10 напругу конденсатора 9. В системі керування напругою конденсатора 12 розраховують різницю поточної напруги конденсатора  $u_c$  і заданої напруги конденсатора  $u_c^{ref}$   $\Delta u = u_c^{ref} - u_c$ . Корегують сигнал помилки та визначають струм  $i_y^{ref} = \Delta u \cdot k$ .

Контролюють датчиком 6 струми фаз мережі  $i_{abc,gr}$ , датчиком 11 контролюють напругу фаз мережі  $u_{abc,gr}$ . Координатним перетворювачем струму 19 виконують перетворення Парка, аналогічно формулам (1)-(2). Координатним перетворювачем напруги 20 здійснюють перетворення напруги

$$e_{x,gr} = \frac{2}{3} \left[ u_a \cos \theta_{gr} + u_b \cos(\theta_{gr} - \frac{2\pi}{3}) + u_c \cos(\theta_{gr} + \frac{2\pi}{3}) \right]; e_{y,gr} = \frac{2}{3} \left[ u_a \sin \theta_{gr} + u_b \sin(\theta_{gr} - \frac{2\pi}{3}) + u_c \sin(\theta_{gr} + \frac{2\pi}{3}) \right].$$

На підставі вимірних значень струмів та напруг мережі над якими виконано перетворення Парка, з урахуванням заданих проекцій вектора струму мережі  $i_{xy,gr}^{ref}$  та поточних проекцій вектора напруги  $e_{xy,gr}$  визначають задані проекції вектора напруги мережевого перетворювача в блоці керування вектором струму 24

$$u_{x,gr}^{ref} = e_{x,gr} + \left( (i_{x,gr}^{ref} - i_{x,gr}) \cdot k_{ep} - i_{y,gr}^{ref} \cdot j\omega L_{i_y} \right); u_{y,gr}^{ref} = e_{y,gr} + \left( (i_{y,gr}^{ref} - i_{y,gr}) \cdot k_{ep} + i_{x,gr}^{ref} \cdot j\omega L_{i_x} \right),$$

де  $k_{ep} = \frac{k_{\dot{a}\dot{o}} T_r}{2T_{\dot{e}\dot{a}} L_m \omega_{\psi \max}}$ ;  $T_r$  - постійна часу фільтра мережі 15;  $L_m$  - індуктивність фільтра 15 мережі;  $\omega_{\psi \max}$  - граничне значення частоти мережі;  $k_{\dot{a}\dot{o}}$  - коефіцієнт передачі датчика струму 6 мережі;  $T_{\dot{e}\dot{a}}$  - мала некомпенсована постійна часу контуру.

Виконують зворотнє перетворення координат в блоці 21 заданої напруги  $u_{xy,gr}^{ref}$  з  $(x,y)$  координат в  $(a,b,c)$

$$u_{a,gr}^{ref} = u_x \cos \theta_{gr} - u_y \sin \theta_{gr}; u_{b,gr}^{ref} = u_x \cos(\theta_{gr} - \frac{2\pi}{3}) - u_y \sin(\theta_{gr} - \frac{2\pi}{3}); u_{c,gr}^{ref} = -(u_a + u_b).$$

Передають напругу мережі  $u_{abc,gr}^{ref}$  на перший вхід блоку широтно-імпульсної модуляції 25, на другий вхід передають задану напругу конденсатора  $u_c^{ref}$ . В блоці широтно-імпульсної модуляції 25 формують опорну напругу

$$U_{carr} = -\frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left[ \operatorname{tg} \left( t_{\text{mod}} \cdot 2\pi \cdot t - \frac{\pi}{2} \right) \right]$$

Визначають рівень вихідної напруги керування транзисторами мережевого перетворювача 13 по фазі  $a$

$$U_{out.a} = \begin{cases} 1 & \text{і дè } U_{carr} > U^{ref} \\ 0 & \text{і дè } U_{carr} < U^{ref} \end{cases}$$

Аналогічно визначають рівні напруги керування транзисторами мережевого перетворювача за фазами  $b$ , і  $c$ . На мережевий перетворювач 13 від системи керування мережевим перетворювачем 14 передають напруги управління мережевим перетворювачем, забезпечуючи передачу активної потужності до мережі та здійснюючи компенсацію реактивної потужності мережі. Фільтр 15 знижує вплив вищих гармонік струму і напруги які віддаються в мережу 16.

Датчики струму 26 і датчик напруги 11 знімають показання навантаження 22 та передають на координатний перетворювач 28, 29. Реалізують пряме перетворення у векторно-матричній формі запису

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix}.$$

В блоці 31 розраховують потужність. Стратегія управління мережевим перетворювачем заснована на теорії  $p$ - $q$  [7]. Компоненти активної  $p$  та неактивної  $q$  потужностей отримують

$$p = u_\alpha \cdot i_\alpha + u_\beta \cdot i_\beta, \quad q = u_\beta \cdot i_\alpha - u_\alpha \cdot i_\beta,$$

Регулювання коефіцієнта потужності перетворювача здійснюють шляхом формування певного співвідношення між заданими значеннями активної і реактивної складових вхідного струму  $(i_x^{ref}, i_y^{ref})$ . При  $i_y^{ref} = 0$  випрямляч обмінюється з мережею тільки активною енергією.

Блок орієнтації виконує обчислення параметрів мережевої напруги  $U_g, \omega_u, \varphi_u$  за результатами вимірювання миттєвих значень напруг у фазах мережі, а також здійснює перетворення вхідних струмів в координатну систему  $x, y$ , орієнтовану по вектору мережевої напруги.

Компоненти потужності згенеровані мережевим перетворювачем  $p_x$  і  $q_x$ , включають складові необхідні для компенсації гармонік, несиметрії і реактивної потужності, а також енергію доступну від первинного двигуна

$$p_x = p_{res} - p_{reg} + \tilde{p}; \quad q_x = \bar{q}_{res} + q$$

В блоці 31 з урахуванням параметрів обчислюється струм в  $\alpha$ - $\beta$  координатах

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ q_x \end{bmatrix},$$

де  $u^2 = u_\alpha^2 + u_\beta^2$  – діюче значення напруги.

$$i_{c\alpha} = \frac{1}{u^2} (u_\alpha \cdot p + u_\beta \cdot q); \quad i_{c\beta} = \frac{1}{u^2} (-u_\alpha \cdot q + u_\beta \cdot p).$$

Узагальнений вектор можна представити в обертовій системі координат 32. Якщо вектор струму представлений в нерухомій системі координат  $\alpha - \beta$ , то перехід до нової системи координат  $x - y$ , розгорнутої щодо вихідної на деякий кут  $\theta$ , здійснюється з співвідношення аргументів комплексних чисел у вигляді

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix}.$$

Роботу комплексу досліджено (рис. 2) при наступних параметрах силової частини:

Асинхронний генератор з короткозамкненим ротором: активний опір статора - 0,087 Ом; індуктивний опір статора - 0,8 мГн; активний опір ротора - 0,228 Ом; індуктивний опір ротора - 0,8 мГн; індуктивність намагнічування - 34,7 мГн; число полюсів - 4; момент інерції - 0,1 кг·м<sup>2</sup>. Конденсатор: ємність - 1 мФ; первісна напруга конденсатора - 750 В; Вихідний струм (1-

вихідний струм; 0 - немає струму на виході) - 0. Трифазний фільтр: опір на фазу - 3,87 мОм; індуктивність на фазу - 2 мГн. Мережа: напруга мережі - 250 В; частота мережі - 50 Гц.

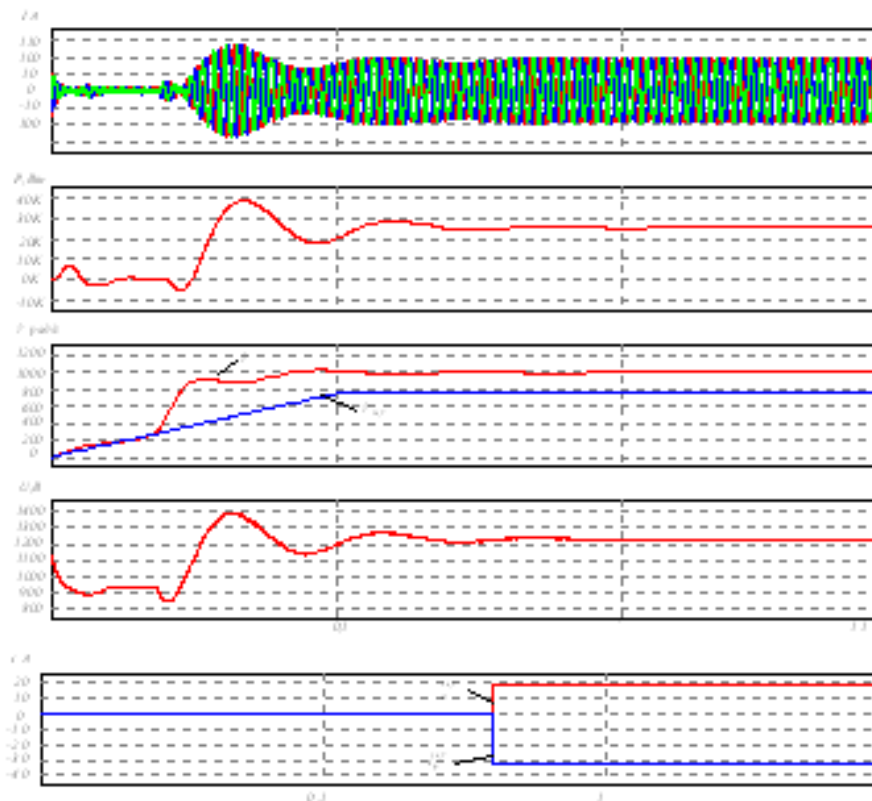


Рис. 2. Результати моделювання режиму електротехнічного комплексу

**Висновки та напрям подальших досліджень.** Обґрунтовано використання мережевого перетворювача комплексу генерації енергії на базі асинхронного генератора для керування потоком активної та неактивної складових потужності для зниження рівня неактивної потужності у вузлі мережі. Отримана структура системи має певну симетрію відносно конденсаторного накопичувача, як з графічної позиції, так і з позиції напрямку перетворення енергії реактивного характеру.

Розроблена структура системи керування мережевим перетворювачем відповідно до основних положень  $p-q$  теорії, яка, шляхом формування складової реактивного струму у каналі управління, забезпечує режим мережевого перетворювача, який додатково забезпечує компенсацію неактивних складових потужності вузла мережі.

#### Список літератури

1. Асинхронные генераторы [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.allgen.ru/press/articles/show/63>
  2. Серeda Д.С. Порівняння робочих характеристик генератора постійного струму та асинхронного генератора та узгодження їх з характеристиками вітротурбіни лабораторної установки / Д.С. Серeda, О.В. Бялобржеський // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Науково-виробничий журнал XIV Міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика". 14-16 травня 2013 р. – Кременчук, КрНУ, 2013. – С. 123-127.
  3. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия, Книга 1 «Ветроэлектрогенераторы» / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : «ХАИ», 2003. – 400 с.
  4. Марков. А. М. Система статорного возбуждения асинхронного генератора / А. М. Марков, В. В. Замаруев, В. В. Ивахно. К.: Технічна електродинаміка, 2000. – 230 с.
  5. Торопцев Н. Д. Асинхронные генераторы для автономных электрических установок / Н. Д. Торопцев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2004. – 86 с.
  6. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. / Дж. Твайделл. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
  7. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. – Hoboken, New Jersey, USA: IEEE press, 2007. – 379 p.
  7. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. Ленина. - Иваново, 2008. - 298 с.
- Рукопис подано до редакції 21.03.16