



УДК 621.313.17

**ГРЕБЕНИКОВ В.В.**, доктор техн. наук,**ПРЬЙМАК М.В.**, инженер I кат.,

Институт электродинамики НАН Украины, Киев

## **ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ МАГНИТНЫМ РЕДУКТОРОМ ДЛЯ ВЕТРОУСТАНОВКИ**

*Приведены данные численных исследований цилиндрического магнитного редуктора и электрогенератора с постоянными магнитами. Показано, что применение редуктора на постоянных магнитах позволяет повысить частоту вращения электрогенератора заданной мощности и, тем самым, уменьшить его размеры и массу. Приведены результаты моделирования редуктора и электрогенератора с постоянными магнитами, и произведено сравнение расчетных характеристик электрогенератора номинальной мощностью 0.5 кВт с редуктором и электрогенератора той же мощности, но без применения редуктора. Расчет магнитного поля и характеристик цилиндрического магнитного редуктора и электрогенераторов выполнен в пакетах Magnet и MotorSolve, предоставленных компанией Infolytica.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* магнитный редуктор, электрогенератор, постоянные магниты, внешние характеристики.

**В** настоящее время в связи с ростом цен на электроэнергию для электроснабжения потребителей достаточно часто применяются ветрогенераторы малой мощности ( $P=300-500$  Вт). При этом используются ветрогенераторы как с горизонтальной, так и с вертикальной осью вращения, частота вращения которых при средней скорости ветра  $V=3-5$  м/с достаточно мала и составляет примерно  $n=100$  об/мин [1]. Тихоходный электрогенератор для ветроустановки с такой частотой вращения при непосредственном соединении вала ветроротора и электрогенератора имеет достаточно большие габариты, а, следовательно, и стоимость, поэтому часто применяются повышающие редукторы (мультиплексоры), которые позволяют повысить частоту вращения электрогенератора в несколько раз и, тем самым, уменьшить массу его активной части, т.к. электромагнитный крутящий момент пропорционален объему электрической машины. Однако механические редукторы являются источником

дополнительного шума, требуют достаточно частого обслуживания, снижают долговечность работы ветроустановки.

В последнее время для ветроустановок все чаще используются магнитные редукторы на постоянных магнитах, которые в отличие от механических редукторов не создают дополнительного шума, не требуют смазки, долговечность работы у них выше, эксплуатационные затраты также существенно снижаются, при этом магнитный редуктор может быть объединён с электрогенератором [2-4].

Также представляется целесообразной не объединенная в единое целое конструкция, а состоящая из отдельных магнитного редуктора и электрогенератора с постоянными магнитами. Применение повышающего редуктора позволяет увеличить номинальную частоту вращения электрогенератора, а значит, уменьшить габариты и массу активных материалов и, тем самым, уменьшить стоимость всей системы.

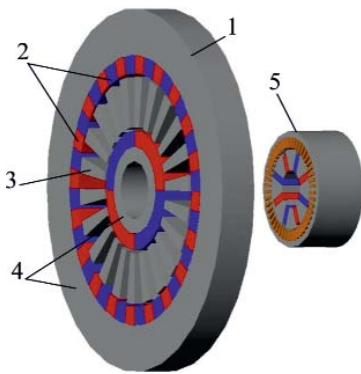


Рис. 1. Магнитная система электрогенератора и магнитного редуктора

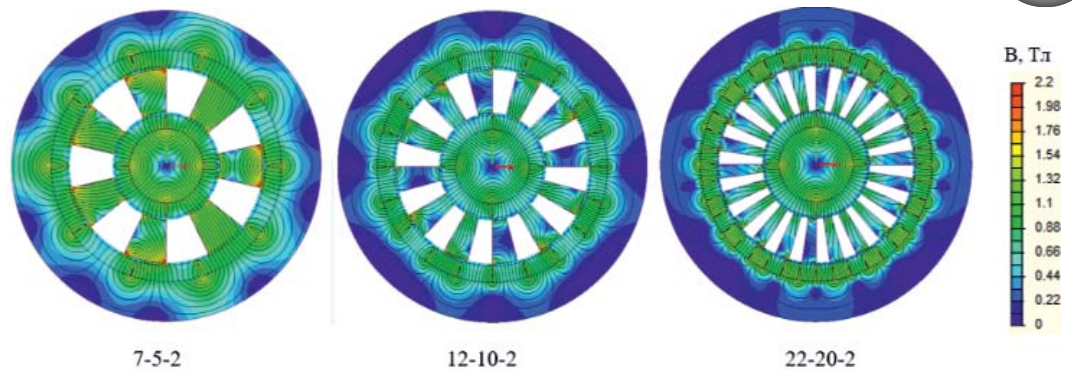


Рис. 2. Картина распределения индукции цилиндрических магнитных редукторов: а – параметры редуктора –  $n_s = 7, p_l = 5, p_h = 2$ ; б –  $n_s = 12, p_l = 10, p_h = 2$ ; в –  $n_s = 22, p_l = 20, p_h = 2$ .

Целью данной статьи являются численные исследования характеристик цилиндрического магнитного редуктора, работающего совместно с электрогенератором на постоянных магнитах и сравнение расчетных характеристик электрогенератора номинальной мощностью 0,5 кВт с магнитным редуктором и электрогенератора той же мощности, но без применения редуктора.

На (Рис. 1) упрощенно показаны магнитные системы устройства, состоящего из повышающего редуктора и электрогенератора. Магнитный редуктор состоит из внешнего низкоскоростного ротора 1, который сочленяется с лопастями ветротурбины, неподвижных ферромагнитных сегментов 2 и внутреннего высокоскоростного ротора 3, постоянные магниты внутреннего и внешнего ротора закреплены на стальных замыкателях 4. Внутренний высокоскоростной ротор сочленен с ротором электрогенератора 5, который содержит восемь постоянных магнитов тангенциальной намагниченности. Анализ и сопоставление различных конструктивных модификаций генераторов с постоянными магнитами небольшой мощности

показывает, что генераторы с тангенциальным намагничиванием магнитов при одинаковых габаритных размерах имеют больший электромагнитный момент [5, 6]. Поэтому в настоящем исследовании за основу была взята конфигурация магнитной системы ротора с тангенциально намагниченными магнитами.

Конфигурация магнитной системы магнитных редукторов существенным образом влияет на их характеристики [2]. Передаточное отношение магнитного редуктора и число неподвижных ферромагнитных сегментов определяется соотношением между числом пар полюсов на низкоскоростном (внешнем) и высокоскоростном (внутреннем) роторе:

$$G_r = p_h/p_l; \omega_h = -G_r \omega_l; n_s = p_l + p_h,$$

где  $G_r$  – передаточное отношение магнитного редуктора;  $p_l$  – число пар полюсов низкоскоростного ротора;  $p_h$  – число пар полюсов высокоскоростного ротора;  $n_s$  – число неподвижных ферромагнитных сегментов;  $\omega_l$  – частота вращения низкоскоростного ротора;  $\omega_h$  – частота вращения вы-

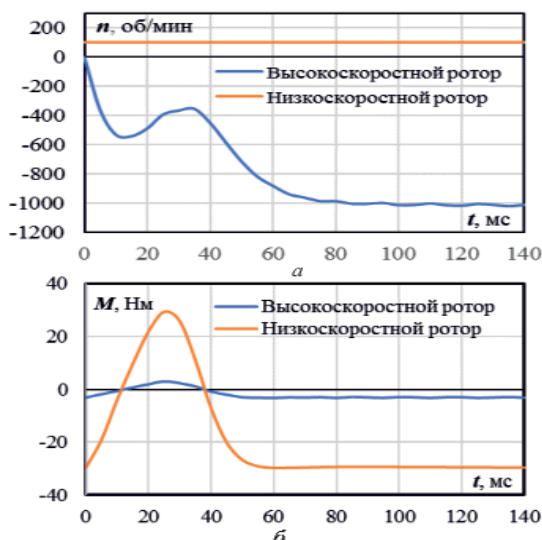


Рис. 3. Характеристики магнитного редуктора: зависимость частоты вращения от времени (а) и электромагнитного момента от времени (б).

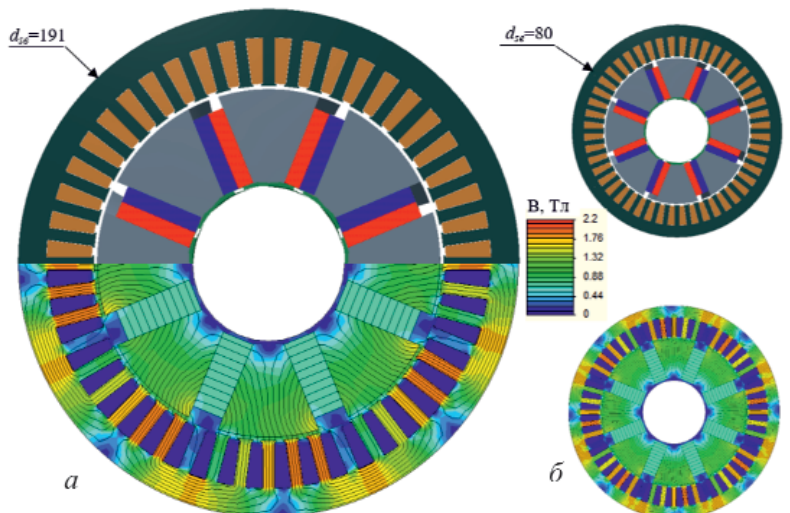


Рис. 4. Общий вид и картина распределения магнитной индукции: а – генератора G100, номинальная частота вращения  $n = 100$  об/мин; б – генератора G1000 ( $n = 1000$  об/мин).

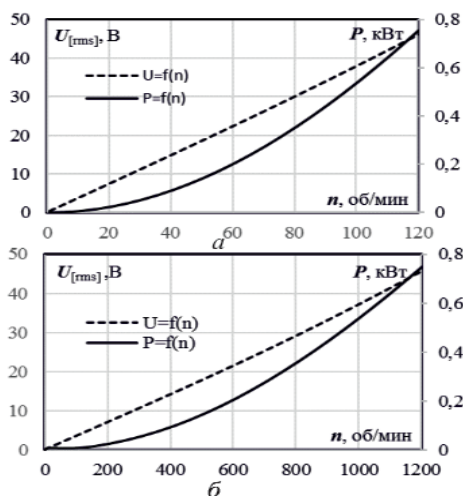


Рис. 5. Зависимость мощности и действующего фазного напряжения от частоты вращения: а – генератора G100 ( $n = 100$  об/мин); б – генератора G1000 ( $n = 1000$  об/мин).

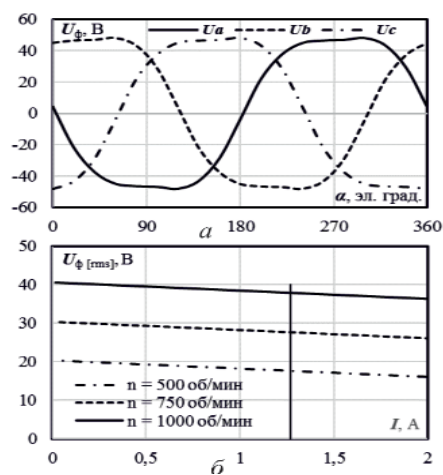


Рис. 6. Зависимость напряжения от времени при частоте вращения  $n = 1000$  об/мин (а) и внешняя характеристика генератора G1000 (б).

сокоростного ротора (низкоскоростной и высокоскоростной ротор вращаются в противоположных направлениях).

Было исследовано несколько конструктивных модификаций магнитных редукторов с различным передаточным отношением. На Рис. 2, а представлены картины распределения магнитной индукции для редуктора, параметры которого следующие:  $n_s = 7, p_l = 5, p_h = 2, G_r = 2.5$ ; на Рис. 2, б –  $n_s = 12, p_l = 10, p_h = 2, G_r = 5$ ; на Рис. 2, в –  $n_s = 22, p_l = 20, p_h = 2, G_r = 10$ . Размеры для всех исследуемых редукторов следующие: внешний диаметр редуктора –  $D_{al} = 250$  мм; внутренний диаметр замыкателя низкоскоростного ротора –  $D_{il} = 186$  мм; толщина магнитов низкоскоростного ротора –  $h_l = 13$  мм; зазор между низкоскоростным ротором и неподвижными ферромагнитными элементами –  $\delta_l = 2$  мм; высота неподвижных ферромагнитных сегментов –  $h_s = 34.8$  мм; зазор между неподвижными ферромагнитными элементами и высокоскоростным ротором –  $\delta_h = 2$  мм; толщина магнитов высоко-

скоростного ротора –  $h_h = 13$  мм; аксиальная длина редуктора –  $L_G = 25$  мм.

Расчет магнитного поля, электромагнитного момента и частоты вращения для исследуемых магнитных редукторов производился в программном пакете INFOLYTICA Magnet [7] при следующих условиях: коэрцитивная сила постоянных магнитов задавалась равной  $H_{CB} = 765$  кА/м; остаточная индукция  $B_r = 1.0$  Тл, магнитная проницаемость магнитов принята равной –  $\mu_{PM} = 1,04$ .

Для всех исследуемых магнитных редукторов масса постоянных магнитов как высокоскоростного ротора, так и низкоскоростного, одинаковы, следовательно, чем выше передаточное отношение редуктора, тем выше частота вращения высокоскоростного ротора, и в результате будет меньше общая масса генератора. Однако, для редуктора с большим передаточным отношением требуется большее число неподвижных ферромагнитных сегментов, и при высоком передаточном отношении толщина этих сегментов будет мала, а значит они будут насыщаться. Поэтому численными экспериментами установлено, что для данного соотношения между внешним и внутренним диаметрами неподвижных ферромагнитных сегментов оптимальное передаточное отношение редуктора равно  $G_r = 10$  (Рис. 2, в). При этой конфигурации еще не наступает насыщения неподвижных ферромагнитных сегментов.

На Рис. 3, а приведены графики частоты вращения для низкоскоростного и высокоскоростного роторов магнитного редуктора с основными соотношениями:  $n_s = 22, p_l = 20, p_h = 2, G_r = 10$ . Частота вращения низкоскоростного ротора задавалась равной  $\omega_l = 100$  об/мин, по-

Таблица 1. Сравнение основных параметров генераторов

| Параметр                                       | Генератор G100<br>$n = 100$<br>об/мин | Генератор G1000<br>$n = 1000$<br>об/мин |
|--|---------------------------------------|---|
| Число пазов статора – $Z$                      | 48                                    | 48                                      |
| Число полюсов ротора – $p$                     | 8                                     | 8                                       |
| Частота вращения – $n$ , об/мин                | 100                                   | 1000                                    |
| Диаметр статора наружный – $d_{se}$ , мм       | 191                                   | 80                                      |
| Диаметр статора внутренний – $d_{si}$ , мм     | 133                                   | 55,8                                    |
| Аксиальная длина – $l_{Fe}$ , мм               | 100                                   | 35                                      |
| Рабочий зазор – $\delta$ , мм                  | 1,3                                   | 0,5                                     |
| Тип постоянных магнитов                        | NdFeB                                 | NdFeB                                   |
| Остаточная индукция магнитов – $B_r$ , Тл      | 1,0                                   | 1,0                                     |
| Размеры магнитов, мм                           | 30×12×100                             | 13×5×35                                 |
| Количество магнитов                            | 8                                     | 8                                       |
| Число витков обмотки, W                        | 50                                    | 32                                      |
| Мощность при номинальной частоте вращения, кВт | 0,535                                 | 0,539                                   |



скільки така частота вращения ветроколеса при средней скорости ветра  $V = 5$  м/с. Из графика Рис. 3, а видно, что через  $t = 60$  мс высокоскоростной ротор этого редуктора выходит на установившуюся частоту вращения  $\omega_l = 1000$  об/мин, т.е. в 10 раз большую, чем частота вращения низкоскоростного ротора. Колебания частоты высокоскоростного ротора в диапазоне времени —  $t = 0 \div 60$  мс связаны с тем, что начальное взаимное положение между низкоскоростным и высокоскоростным ротором было таковым, что потребовалось какое-то время для вхождения в синхронизм.

На Рис. 3, б показаны зависимости от времени электромагнитного момента, действующего на низкоскоростной и высокоскоростной ротор. Исходные условия для расчета: нагрузка на высокоскоростном роторе —  $M_h = 5$  Нм; коэффициент вязкого трения на высокоскоростном роторе  $k_h = 0,075$  Нм·с/рад. При этих условиях, как следует из графика, на внешнем (низкоскоростном) роторе электромагнитный момент равен  $M_l = 30$  Нм, а на внутреннем (высокоскоростном) —  $M_h = 3$  Нм, т.е. электромагнитный момент перераспределяется между роторами в соответствии с коэффициентом редукции, равном  $G_r = 10$ . В диапазоне времени —  $t = 0 \div 60$  мс также наблюдаются колебания электромагнитного момента на низкоскоростном и высокоскоростном роторе.

Таким образом, применение магнитного редуктора с передаточным числом  $G_r = 10$  позволяет использовать генератор с номинальной частотой вращения  $n = 1000$  об/мин, вместо генератора с номинальной частотой вращения  $n = 100$  об/мин, при непосредственном (без редуктора) соединении вала ветроколеса с валом генератора. В работе произведено сравнение характеристик двух электрогенераторов номинальной мощностью 0,5 кВт с номинальной частотой вращения  $n = 100$  об/мин и  $n = 1000$  об/мин.

При разработке тихоходного генератора за основу был взят статор асинхронного электродвигателя АИР112L8, в котором вместо короткозамкнутого ротора использовался восьмиполюсный ротор с тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов. На Рис. 4, а показан общий вид и картина распределения магнитной индукции генератора G100 с номинальной частотой вращения  $n = 100$  об/мин, внешний диаметр статора этого генератора равен  $d_{se} = 191$  мм, аксиальная длина активной части статора и ротора равна  $l_{Fe} = 100$  мм.

На Рис. 4, б показан общий вид и картина распределения магнитной индукции генератора

Таблица 2. Сравнение массы активных материалов

|                                     | G1000 | G100  | Магнитный редуктор |
|-------------------------------------|-------|-------|--------------------|
| Масса стали ротора, кг              | 0,33  | 5,39  | —                  |
| Масса магнитов, кг                  | 0,09  | 1,46  | 1,77               |
| Масса стали статора, кг             | 0,47  | 7,63  | —                  |
| Масса обмоток, кг                   | 0,32  | 4,78  | —                  |
| Общая масса стали, кг               | 0,8   | 13,02 | 5,68               |
| Общая масса активных материалов, кг | 1,21  | 19,26 | 7,45               |

G1000 с номинальной частотой вращения  $n = 1000$  об/мин. Внешний диаметр статора этого генератора равен  $d_{se} = 80$  мм, аксиальная длина активной части статора и ротора равна  $l_{Fe} = 35$  мм. Конфигурация магнитной системы этого генератора такая, как и у генератора G100, но основные геометрические размеры выбраны таким образом, чтобы обеспечить заданную мощность при номинальной частоте вращения:  $P \geq 0,5$  кВт при  $n = 1000$  об/мин.

Расчет магнитного поля и характеристик исследуемых генераторов производился в программном пакете INFOLYTICA MotorSolve при следующих условиях: коэрцитивная сила постоянных магнитов задавалась равной  $H_{CB} = 765$  кА/м, остаточная индукция  $B_r = 1.0$  Тл, магнитная проницаемость магнитов принята равной —  $\mu_{пм} = 1,04$ ; магнитопровод ротора — конструкционная сталь СТ20 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали); магнитопровод статора — сталь СТ2211. Для уменьшения пульсаций электромагнитного момента применен скос полюсов на роторе на одно зубцовое деление [6, 7]. Каждая из фаз имеет четыре последовательно включенные катушки. Число витков каждой фазы в исследуемых генераторах подбирались таким образом, чтобы обеспечить при номинальной частоте вращения максимальное значение напряжения, равное  $U_{\phi} = 48$  В. С учетом коэффициента заполнения паза равного  $k_Q = 0,63$  плотность тока в фазах задавалась равной  $J_A = 5$  А/мм<sup>2</sup>.

Сравнение основных параметров двух исследуемых генераторов приведены в Табл. 1. Следует отметить, что в результате численного моделирования параметры обоих генераторов подобраны таким образом, что при номинальной частоте вращения мощности генераторов практически совпадают:  $P_{G100} = 0,535$  кВт и  $P_{G1000} = 0,539$  кВт, однако масса активных частей низкоскоростного генератора в 15,9 раза больше, чем у генератора с номинальной частотой вращения  $n = 1000$  об/мин.

Таким образом, применение магнитного редуктора для повышения частоты вращения позволяет при равной мощности существенно уменьшить габариты генератора: внешний диаметр в 2,4



раза; аксиальную длину статора и ротора – 2,9 раза, объем активной части – 16,3 раза.

На Рис. 5 приведены зависимости мощности и действующего фазного напряжения исследуемых генераторов от частоты вращения ротора.

Также рассчитывалась зависимость генерируемого напряжения от времени и внешние характеристики генератора G1000. На Рис. 6, а приведены зависимости фазных напряжений от угла поворота ротора при номинальной частоте вращения, а на Рис. 6, б приведены внешние характеристики – зависимость падения напряжения в нагрузке, подключенной к обмоткам статора от величины тока  $U_{\text{ф[rms]}} = f(I)$  для нескольких значений частоты вращения  $n = 1000$  об/мин, 750 об/мин и 500 об/мин. Номинальный ток этого генератора равен  $I_n = 1,27$  А.

Анализируя эти графики, следует отметить, что максимальное значение фазного напряжения равно  $U_{\text{фmax}} = 48$  В. Жесткость внешней характеристики равна –  $\Delta U_{\text{ном}} = (U_0 - U_{\text{ном}})/U_{\text{ном}} \cdot 100\% = 6,8\%$ , а обычно для генераторов независимого возбуждения  $\Delta U_{\text{ном}} = 5-10\%$ .

В Табл. 2 приведено сравнение масс активных материалов двух генераторов и магнитного редуктора. Анализируя данные двух генераторов и магнитного редуктора, следует отметить, что применение повышающего редуктора для ветроустановки позволяет существенно уменьшить габариты и массу активных частей генератора: общая масса стали уменьшена в 16,3 раза, масса обмоток – в 14,9 раза, масса магнитов – в 16,2 раза. Общая масса активных материалов генератора G1000 и магнитного редуктора составляет – 8,66 кг, т.е. в 2,2 раза меньше, чем для генератора G100. Общая масса магнитов генератора G1000 и магнитного редуктора составляет – 1,86 кг, т.е. в 1,27 раза больше, чем для генератора G100.

### Выводы

1. Для ветроустановки небольшой мощности с номинальной частотой вращения ротора 100 об/мин

целесообразно применять магнитный повышающий редуктор, отличительными характеристиками которого являются: бесшумность работы, отсутствие смазки, долговечность работы без обслуживания.

2. Применение магнитного редуктора с передаточным отношением  $G_r = 10$  позволяет существенно уменьшить массу и габариты электрогенератора по сравнению со случаем непосредственного присоединения генератора к валу ветроротора. В результате численных исследований установлено, что при номинальной мощности генератора равной  $P_n = 0,5$  кВт, общая масса активных материалов генератора G1000 с номинальной частотой вращения  $n = 1000$  об/мин и магнитного редуктора составляет – 8,66 кг, т.е. в 2,2 раза меньше, чем для генератора G100 с номинальной частотой вращения  $n = 100$  об/мин.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дзензерский В.А., Тарасов С.В., Костюков И.Ю. Ветроустановка малой мощности. – Киев: Наук. Думка. 2011. – 590 с.
2. By L. Jian, G. Xu, Y. Gong, J. Song, J. Liang, M. Chang. Electromagnetic design and analysis of a novel magnetic-gear-integrated wind power generator using time-stepping finite element method // Progress In Electromagnetics Research. – 2011. – Vol. 113. – P. 351.
3. H. Pnlinder, J. Ferreira, B. Jensen, A. Abrahamsen, K. Atallah, R. McMahon. Trends in wind turbine generator systems // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2013. – vol. 1. – No. 3. – P. 174–185.
4. X. Li, K.-T. Chau, M. Cheng, W. Hua. Comparison of magnetic-gear permanent-magnet machines // Progress In Electromagnetics Research. – 2013. – Vol. 133. – P. 177–198.
5. Гребеников В.В., Приймак М.В. Ветроустановка с ротором Дарье и электрогенератором на постоянных магнитах // Гідроенергетика України. – 2016. – №3–4. – С. 40–46.
6. Гребеников В.В. Сравнительный анализ электродвигателей с различной конфигурацией магнитных систем // Вісник Національного технічного університету "ХПІ": зб. наук. пр. Вип. 1 (1223). Серія: Електричні машини та електро-механічне перетворення енергії. – 2017. – С.119 – 124.
7. <http://www.infolytica.com/en/applications/ex0106/>

© Гребеников В.В., Приймак М.В., 2017

