

## Определение ЭДС и главных размеров торцевых магнитоэлектрических генераторов с беспазовым сердечником статора и кольцевой обмоткой якоря

В.П. Шишкин, Ю.Б. Казаков  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: shishkin@emf.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Корректное задание главных размеров электрических машин определяет конструктивное исполнение элементов машин. Специфические особенности конструкции торцевого генератора с постоянными магнитами и кольцевой обмотки статора не позволяют использовать известные формулы для вычисления ЭДС фазы и главных размеров цилиндрических машин с барабанным якорем. Требуется иная методика определения числа витков в фазе и главных размеров, существенно зависящих от электромагнитных нагрузок (индукции в воздушном зазоре и линейной токовой нагрузки) и размеров магнитоэлектрического генератора. Проблема усугубляется тем, что, в отличие от электрических машин с электромагнитным возбуждением, при проектировании которых используются проверенные эксплуатацией подобных машин рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок, для торцевых магнитоэлектрических генераторов такие рекомендации отсутствуют.

**Материалы и методы:** Для вывода соотношения для ЭДС переменного тока кольцевой обмотки якоря и обмоточных данных торцевого магнитоэлектрического генератора используется закон электромагнитной индукции и конструктивные особенности генератора. Главные размеры определяются из соотношений для электромагнитной мощности, ЭДС кольцевой обмотки и магнитодвижущей силы продольной размагничивающей реакции якоря при полном  $m$ -фазном коротком замыкании.

**Результаты:** Получены соотношения для расчета обмоточных данных и ЭДС кольцевой обмотки, внутреннего и внешнего диаметров, длины беспазового сердечника статора торцевого магнитоэлектрического генератора с кольцевой обмоткой якоря.

**Выводы:** Полученные соотношения для ЭДС учитывают специфику кольцевой обмотки и позволяют корректно определять обмоточные данные торцевого генератора с беспазовым сердечником статора. Главные размеры торцевого магнитоэлектрического генератора возможно определять без использования линейной токовой нагрузки и индукции в воздушном зазоре, являющихся функцией главных размеров машины.

**Ключевые слова:** ЭДС кольцевой обмотки, торцевой магнитоэлектрический генератор, беспазовый сердечник статора, электромагнитные нагрузки.

## Determination of EMF and major dimensions of axial-flux magnetolectric generators with smooth stator core and ring winding of the armature

V.P. Shishkin, Yu.B. Kazakov  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: shishkin@emf.ispu.ru

### Abstract

**Background:** Correctly assigned major dimensions of electrical machines are vital to machine elements design. Specific design features of the axial-flux generator with permanent magnets and a ring stator winding do not allow using well-known formulas for the calculation of EMF phases and major dimensions of cylindrical armature machines. A different method should be used to determine the number of turns in the main phase and dimensions that to a large extent depend on the electromagnetic load (the induction in the air gap and the linear current load) and magnetolectric generator size. The problem is made worse by the fact that there are no recommendations for axial-flux magnetolectric generators, unlike those for electric cars with electromagnetic excitation designed in accordance with proven magnetic load recommendations.

**Materials and methods:** The correlation between the EMF of ring armature winding alternating current and winding data of the axial-flux magnetolectric generator was determined by the law of electromagnetic induction and in accordance with the generator design features. The major dimensions were determined from the relations for electromagnetic power, ring winding EMF and magnetomotive force of the longitudinal demagnetizing armature reaction under full  $m$ -phase short-circuit.

**Results:** Equations have been obtained for calculating winding data and ring winding EMF, inner and outer diameters, smooth stator core length of smooth magnetolectric generator with ring armature winding.

**Conclusions:** The obtained EMF correlations account for the specifics of the ring winding and can be used to correctly determine winding data of axial-flux generator with a smooth stator core. The major dimensions of the axial-flux magnetolectric generator can be determined without using a linear current load and induction in the air gap which are the function of the major machine dimensions.

**Key words:** ring winding EMF, axial-flux magnetolectric generator, smooth stator core, electromagnetic loads.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.3.063-067

Торцевой магнитоэлектрический генератор предназначен для комплектования ветроэнергетических установок небольшой (до 5 кВт) мощности [1]. Торцевое исполнение генератора позволяет уменьшить массу и размеры (по сравнению с цилиндрическим генератором), выполнить машину многополюсной, увеличить жесткость конструкции. Такое исполнение создает благоприятные условия охлаждения обмотки [2]. Применение постоянных магнитов исключает скользящий контакт, искрение, радиопомехи. Для изготовления гладкого сердечника статора не требуются дорогостоящие пазовые штампы.

Недостатком конструкции генератора является большой немагнитный промежуток между постоянным магнитом и сердечником статора, который складывается из воздушного зазора между статором и ротором и высоты катушки медной обмотки кольцевого якоря (рис. 1). Для проведения требуемого магнитного потока через такой немагнитный промежуток используются высококоэрцитивные постоянные магниты.

Специфические особенности конструкции торцевого генератора с постоянными магнитами и кольцевой обмотки статора не позволяют использовать известные формулы для вычисления ЭДС фазы и главных размеров цилиндрических машин с барабанным якорем. Требуется иное определение числа витков в фазе и главных размеров, существенно зависящих от электро-

магнитных нагрузок (индукции в воздушном зазоре и линейной токовой нагрузки) и размеров магнитоэлектрического генератора.

Проводники, образующие витки обмотки барабанного якоря, располагаются под полюсами разной полярности, тогда как в кольцевом якоре они располагаются под полюсами одной полярности (рис. 2, а). Поэтому число витков в фазе  $w$ , входящих в формулу ЭДС барабанного якоря

$$E = 4,44fwk_{об}\Phi_m,$$

здесь определяется иначе.

Выведем формулу ЭДС обмотки кольцевого якоря. Магнитный поток в воздушном зазоре одного магнита определяется по формуле (рис. 2,б)

$$\Phi_{\delta} = B_{\delta,ср}\tau l_m,$$

где  $B_{\delta,ср}$  – среднее значение индукции магнитного поля в зазоре;  $\tau$  – полюсное деление;  $l_m$  – длина магнита.

Принимая длину магнита, равной длине проводника  $l_m = l_{пр}$ , получим среднее значение ЭДС одного проводника в виде

$$E_{пр,ср} = B_{\delta,ср}l_{пр}v = \frac{\Phi_{\delta}2p}{\pi D l_m} l_{пр} \frac{\pi D n}{60} = 2\Phi_{\delta}f,$$

где  $D$  – средний диаметр торцевого статора;  $v$  – линейная скорость вращения магнитов на среднем диаметре статора;  $n$  – частота вращения индуктора (об/мин);  $f$  – частота индуцированной ЭДС.

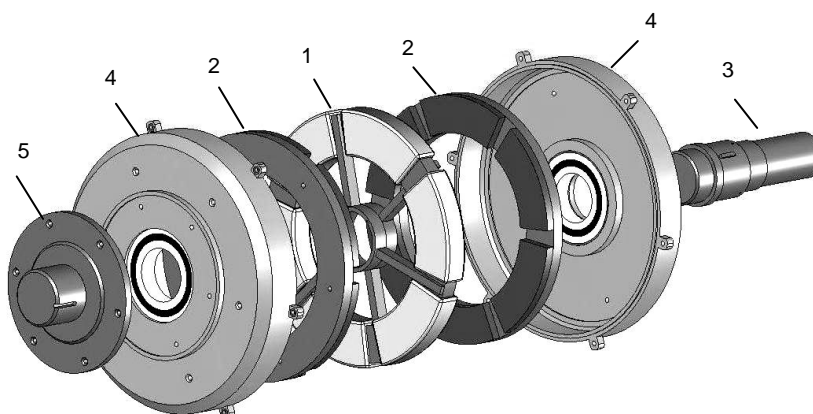


Рис. 1. Основные узлы генератора: 1 – тороидальный статор с кольцевой обмоткой; 2 – индукторы с постоянными магнитами; 3 – неподвижный вал; 4 – подшипниковые щиты; 5 – крышка-фланец, принимающая вращение от ветроколеса или редуктора

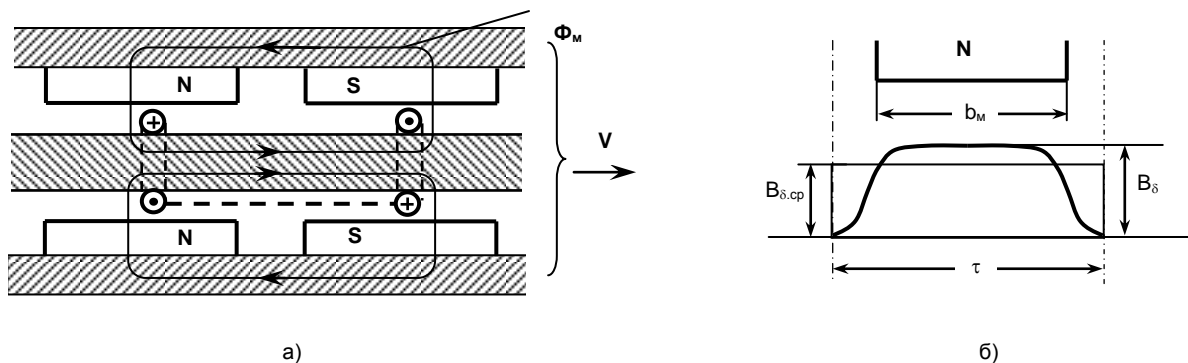


Рис. 2. ЭДС кольцевой обмотки якоря: а – наведение ЭДС в витках кольцевой обмотки; б – распределение индукции под полюсом

Действующее значение ЭДС проводника равно

$$E_{пр} = k_{\phi} E_{пр.ср} = 2k_{\phi} \Phi_{\delta} f,$$

где  $k_{\phi}$  – коэффициент формы поля.

Действующее значение ЭДС витка, состоящего из двух проводников, расположенных под верхним и нижним магнитами, увеличивается в 2 раза:

$$E_{в} = 2E_{пр} = 4k_{\phi} f \Phi_{\delta}.$$

Действующее значение ЭДС катушки с числом витков под одним магнитом  $U_{п}$  будет

$$E_{к} = U_{п} E_{в} = 4U_{п} k_{\phi} f \Phi_{\delta}.$$

ЭДС фазы складывается из ЭДС отдельных катушек, расположенных под  $2p$  полюсами и в общем случае соединенных в  $a$  параллельных ветвей:

$$E_{\phi} = \frac{2p}{a} E_{к} = 8 \frac{p}{a} U_{п} k_{\phi} f \Phi_{\delta} = 4k_{\phi} w_{\phi} f \Phi_{\delta}, \quad (1)$$

где  $w_{\phi}$  – число витков в фазе кольцевой обмотки:

$$w_{\phi} = \frac{2p}{a} U_{п}.$$

Из (1) получим число проводников под одним магнитом (число витков одной катушки кольцевой обмотки)

$$U_{п} = \frac{a E_{\phi}}{8 k_{\phi} p f \Phi_{\delta}}.$$

Главные размеры генератора с постоянными магнитами определяются размерами системы возбуждения, т.е. размерами постоянных магнитов. Формула, устанавливающая связь между главными размерами машин с электромагнитным возбуждением и электромагнитными нагрузками, здесь применима лишь в принципе [3, 4]:

$$D^2 l = \frac{6,1 P'}{\alpha_j k_{\phi} k_{об} A B_{\delta} n_1} \cdot 10^6,$$

где  $P'$  – расчетная (электромагнитная) мощность;  $\alpha_j$  – расчетный коэффициент полюсного перекрытия;  $k_{\phi}$  – коэффициент формы поля;  $k_{об}$  – обмоточный коэффициент;  $A$  – линейная токовая нагрузка;  $B_{\delta}$  – индукция в воздушном зазоре;  $n_1$  – синхронная частота вращения машины.

В синхронных генераторах с постоянными магнитами мы не можем заранее задаться электромагнитными нагрузками ( $A$  и  $B_{\delta}$ ), поскольку они сами являются производными от объема и размеров магнита, его характеристик и степени использования [4]. Найдем основные размеры магнитоэлектрического генератора, используя формулы электромагнитной мощности, ЭДС кольцевой обмотки и МДС продольной размагничивающей реакции якоря при полном  $m$ -фазном коротком замыкании [5, 6].

Электромагнитная мощность синхронного генератора независимо от способа возбуждения определяется по формуле

$$P_{эм} = m E_{\phi} I_{\phi},$$

где  $m$  – число фаз;  $I_{\phi}$  – фазный ток;  $E_{\phi}$  – ЭДС фазы.

Поток в воздушном зазоре от одного постоянного магнита равен

$$\Phi_{\delta} = \frac{\Phi_{м}}{\sigma_0} = \frac{B_{м0}}{\sigma_0} S_{м},$$

где  $\Phi_{м}$  – полный поток постоянного магнита;  $\sigma_0$  – коэффициент рассеяния;  $B_{м0}$  – индукция в нейтральном сечении магнита в режиме холостого хода;  $S_{м}$  – сечение одного магнита:

$$S_{м} = \frac{\pi}{4} (D_{вш}^2 - D_{вн}^2) \frac{\alpha_p}{2p} = \frac{\pi \alpha_p}{8p} D_{вн}^2 (d^2 - 1),$$

где  $D_{вш}$ ,  $D_{вн}$  – внешний и внутренний диаметры сердечника статора;  $\alpha_p$  – геометрический коэффициент полюсного перекрытия;  $d = D_{вш} / D_{вн}$  – соотношение внешнего и внутреннего диаметров статора.

В отличие от машин с электромагнитным возбуждением, в магнитоэлектрических генераторах невозможно форсирование возбуждения, поэтому электромагнитную мощность и объем магнитов следует определять с учетом возможной перегрузки [7, 8]. Предельной перегрузкой является полное  $m$ -фазное короткое замыкание [10].

Магнитодвижущая сила (МДС) продольной реакции якоря на один полюс (один магнит) при полном  $m$ -фазном коротком замыкании равна

$$F_{адк} = 0,45 m U_{п} k_{ад} I_{\phi} k_{кз}, \quad (2)$$

где  $k_{ад}$  – коэффициент продольной реакции якоря;  $k_{кз}$  – кратность тока короткого замыкания.

На основе аналогии между электрическими и магнитными цепями [4, 6] для торцевого магнитоэлектрического генератора можно построить схему замещения магнитной цепи на один полюс (рис. 3), из которой находится МДС магнита:

$$F_{мк} = F_{\delta} + F_{cm} + \frac{F_j}{2} + \frac{F_a}{2} + F_{адк} = \alpha_1 F_{адк}. \quad (3)$$

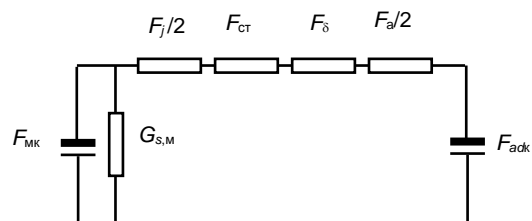


Рис. 3. Схема замещения магнитной цепи торцевого магнитоэлектрического генератора с кольцевой обмоткой якоря на один полюс:  $F_{\delta}$  – падение магнитного потенциала в зазоре;  $F_{ст}$  – падение магнитного потенциала в стыке магнита со спинкой индуктора;  $F_a$  – падение магнитного потенциала в сердечнике статора;  $F_j$  – падение магнитного потенциала в спинке индуктора;  $F_{мк}$  – МДС магнита при коротком замыкании генератора;  $F_{адк}$  – МДС продольной реакции якоря при КЗ;  $G_{с,м}$  – проводимость рассеяния магнита

В формулу (3) введен коэффициент  $\alpha_1$ , учитывающий падение магнитного напряжения в магнитной цепи генератора в долях продольной МДС реакции якоря при коротком замыкании:

$$\alpha_1 = 1 + \frac{F_{\delta} + F_{cm} + F_j/2 + F_a/2}{F_{адк}}.$$

Чтобы постоянный магнит в процессе эксплуатации не потерял своих свойств даже при коротком замыкании, его МДС должна удовлетворять значению [9]

$$F_{\text{МК}} = H_{\text{МК}} h_{\text{М}}, \quad (4)$$

где  $H_{\text{МК}}$  – напряженность поля в магните при коротком замыкании;  $h_{\text{М}}$  – высота магнита.

Из (2) с учетом (4), (3) получим фазный ток статора

$$I_{\text{Ф}} = \frac{H_{\text{МК}} h_{\text{М}}}{\alpha_1 0,45 m U_{\text{П}} k_{\text{ад}} k_{\text{кз}}}. \quad (5)$$

С учетом (1) и (5) электромагнитная мощность генератора будет рассчитываться как

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{k_{\text{Ф}} f \pi \alpha_{\text{р}} B_{\text{М0}} H_{\text{МК}} D_{\text{ВН}}^3 (d^2 - 1) \lambda_{\text{М}}}{0,45 \sigma_0 \alpha_1 k_{\text{ад}} k_{\text{кз}}}, \quad (6)$$

где  $\lambda_{\text{М}} = h_{\text{М}} / D_{\text{ВН}}$ .

Из (6) можно получить внутренний диаметр сердечника статора генератора:

$$D_{\text{ВН}} = \sqrt[3]{\frac{0,45 P_{\text{ЭМ}} \sigma_0 \alpha_1 k_{\text{ад}} k_{\text{кз}}}{k_{\text{Ф}} f \pi \alpha_{\text{р}} B_{\text{М0}} H_{\text{МК}} (d^2 - 1) \lambda_{\text{М}}}}.$$

Тогда внешний диаметр сердечника статора генератора будет равен

$$D_{\text{ВШ}} = d D_{\text{ВН}}.$$

Зная диаметры, найдем длину сердечника статора

$$l_{\text{СТ}} = (D_{\text{ВШ}} - D_{\text{ВН}}) / 2$$

и высоту магнита

$$h_{\text{М}} = \lambda_{\text{М}} D_{\text{ВН}}.$$

Проектирование по предлагаемой методике торцевых магнитоэлектрических генераторов [11, 12] показало, что расчет ЭДС фазы кольцевых обмоток может дать результат, отличающийся от ЭДС барабанных обмоток в 2 раза, а определить главные размеры по предлагаемой методике можно за 1–2 итерации, тогда как по традиционной – за 5–6.

### Заключение

Полученные формулы для расчета обмоточных данных и ЭДС, внутреннего и внешнего диаметров, длины сердечника статора учитывают особенности синхронных торцевых магнитоэлектрических генераторов с гладким беспазовым сердечником статора и кольцевой обмоткой якоря, что повышает точность расчетов и сокращает время проектирования подобных генераторов.

### Список литературы

1. Пат. 54471 Российская Федерация на полезную модель. Торцевой синхронный электрогенератор с возбуждением от постоянных магнитов / В.П. Шишкин, А.В. Трофимов, В.П. Яблоков. Опубл. 01.12.2005 г.
2. Игнатов В.А., Вильданов К.Я. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального исполнения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 301 с.
3. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1964. – 479 с.
4. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 279 с.

5. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высш. шк., 1990. – 415 с.

6. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. – М.: Высш. шк., 1982. – 271 с.

7. Осин И.Л. Синхронные электрические двигатели малой мощности. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 216 с.

8. Зечихин Б.С., Куприянов А.Д. Традиционные и компьютерные методы проектирования бесконтактных синхронных машин // Электричество. – 2002. – № 5. – С. 61–72.

9. Кузнецов В.А., Ширинский С.В. Расчет магнитной цепи синхронного генератора с переменной полюсностью // Электричество. – 2003. – № 7. – С. 46–52.

10. Ганджа С.А. Анализ электромагнитной мощности для различных конструктивных исполнений вентиляльных машин с аксиальным потоком // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. – 2010. – Вып. 12, № 34. – С. 58–62.

11. Ганджа С.А. Оптимальное проектирование вентиляльных электрических машин с аксиальным магнитным потоком для ветроэнергетических установок малой мощности // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 10. – С. 78–83.

12. Шишкин В.П. Автоматизированное проектирование торцевых магнитоэлектрических генераторов переменного тока: учеб. пособие. – Иваново, 2006. – 68 с.

### References

1. Shishkin, V.P., Trofimov, A.V., Yablokov, V.P. *Tortseyvoy sinkhronnyy elektrogenerator s vzbuzhdeniem ot postoyannykh magnitov* [Axial-flux synchronous electric generator with excitation from permanent magnets]. Patent RF, no. 54471, 2005.
2. Ignatov, V.A., Vil'danov, K.Ya. *Tortseyvye asinkhronnye elektrodvigateli integral'nogo ispolneniya* [Axial-flux asynchronous integrated electric motors]. Moscow, Energoatomizdat, 1990. 301 p.
3. Balagurov, V.A., Galteev, F.F., Larionov, A.N. *Elektricheskie mashiny s postoyannymi magnitami* [Electrical machines with permanent magnets]. Moscow, Energiya, 1964. 479 p.
4. Balagurov, V.A., Galteev, F.F. *Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami* [Electric generators with permanent magnets]. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 279 p.
5. But, D.A. *Beskontaktnye elektricheskie mashiny* [Contactless electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 1990. 415 p.
6. Balagurov, V.A. *Proektirovanie spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka* [Design of special electrical machines of alternating current]. Moscow, Vysshaya shkola, 1982. 271 p.
7. Osin, I.L. *Sinkhronnye elektricheskie dvigateli maloy moshchnosti* [Synchronous electric motors of low power]. Moscow Izatel'skiy dom MEI, 2006. 216 p.
8. Zechikhin, B.S., Kupriyanov, A.D. Traditsionnye i komp'yuternye metody proektirovaniya beskontaktnykh sinkhronnykh mashin [Conventional and computer methods of contactless synchronous car design]. *Elektrichestvo*, 2002, no. 5, pp. 61–72.
9. Kuznetsov, V.A., Shirinskiy, S.V. Raschet magnitnoy tsepi sinkhronnogo generatora s peremennoy polyusnost'yu [Magnetic chain calculation of the variable polarity synchronous generator]. *Elektrichestvo*, 2003, no. 7, pp. 46–52.
10. Gandzha, S.A. Analiz elektromagnitnoy moshchnosti dlya razlichnykh konstruktivnykh ispolneniy ventil'nykh mashin s aksial'nym potokom [Analysis of electromagnetic power for various designs of axial flow valve cars]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Energetika*, 2010, issue 12, no. 34, pp. 58–62.
11. Gandzha, S.A. Optimal'noe proektirovanie ventil'nykh elektricheskikh mashin s aksial'nym magnitnym potokom dlya vetroenergeticheskikh ustanovok maloy moshchnosti [Optimum design of axial magnetic flow electrical valve machines for wind power installations of low power]. *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2011, no. 10, pp. 78–83.
12. Shishkin, V.P. *Avtomatizirovannoe proektirovanie tortseyvykh magnitoelektricheskikh generatorov peremennogo toka* [Automated design of axial-flux magnetoelectric generators of alternating current]. Ivanovo, 2006. 68 p.

*Шишкин Валерий Павлович*,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, профессор кафедры электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-47,  
e-mail: shishkin@emf.ispu.ru

*Казаков Юрий Борисович*,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-06,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru