

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.84

Методика выбора размеров активной части торцевых магнитоэлектрических генераторов с минимальными массогабаритными показателями

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: Ветрогенераторы часто выполняют торцевой конструкции. Для цилиндрических машин критерии выбора размеров генератора с минимальной массой и габаритами выработаны, для торцевых магнитоэлектрических машин они отсутствуют. В связи с этим актуальной является разработка методики получения функциональной зависимости рациональных размеров торцевых генераторов от некоторого относительного конструктивного параметра.

Материалы и методы: Конструктивный параметр торцевых машин выбран как отношение внешнего и внутреннего диаметров. Функциональная зависимость рациональных размеров от конструктивного параметра сформирована с использованием коэффициентов внешнего, внутреннего и среднего диаметров, длины, сечения, массы и объема материалов. Анализ функциональных зависимостей выполнен в пакете Mathcad с функцией Minimize. Определены оптимальные значения конструктивного параметра для генераторов с разными числами полюсов.

Результаты: Разработана методика выбора размеров торцевых магнитоэлектрических генераторов с минимальными массой и габаритами. Получена функциональная зависимость размеров и объема материалов от конструктивного параметра. Рациональный коэффициент внешнего диаметра начиная со значения конструктивного параметра 1,4 изменяется незначительно, при значении 1,6–1,9 он минимален. Оптимальный конструктивный параметр генератора возрастает от 1,104 до 1,246 при увеличении числа пар полюсов от 1 до 6.

Выводы: Использование конструктивного параметра торцевых магнитоэлектрических генераторов как отношения внешнего и внутреннего диаметров позволяет сформировать функциональные взаимосвязи размеров генератора и сконструировать машину с минимальным объемом материалов.

Ключевые слова: магнитоэлектрический генератор, торцевая конструкция, относительный конструктивный параметр, методика определения размеров, минимум массогабаритных показателей.

Method of selecting the dimensions of the active part of end-type magnetoelectric generators with minimum mass-dimensional indicators

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

Abstract

Background: Wind turbines often represent an end structure. There are criteria for selecting the dimensions of the generator with minimum mass and dimensions for cylindrical machines but there are no criteria for end-type magnetoelectric machines. All this makes it an urgent task to develop a method of obtaining a functional dependence of the rational dimensions of the end-type generators on some relative design parameter.

Materials and methods: The chosen design parameter of end machines is expressed as the ratio of outer and inner diameters. The functional dependence of the rational dimensions on the design parameter is formed using the coefficients of outer, inner and average diameters, length, section, mass and volume of materials. The functional dependences have been analyzed in the Mathcad package with the Minimize function. The optimal values of the design parameter for generators with different pole numbers have been determined.

Results: A method for selecting the dimensions of the end magneto-electric generators with minimum mass and dimensions has been developed. A functional dependence of the dimensions and volume of materials on the design parameter has been obtained. The rational coefficient of the outer diameter, starting from the design parameter value 1,4, changes insignificantly, and at 1,6–1,9 it is minimal. The optimal design parameter of the generator rises from 1,104 to 1,246 with an increase in the number of pole pairs from 1 to 6.

Conclusions: Using the design parameter of the end magneto-electric generators as a ratio of the outer and inner diameters allows us to obtain functional interrelations of the generator dimensions and to design a machine with the minimum volume of materials.

Key words: magneto-electric generator, end structure, relative design parameter, technique of size determination, minimum mass and dimensions.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.4.031-036

Введение. Выработка электроэнергии ветрогенераторами в мире растет опережающими темпами – до 15 % в год. Возрастает потребность в ветрогенераторах, увеличивается их мощность. В целях максимального использования энергии ветра ветрогенераторы устанавливаются на достаточно высоких опорах-мачтах. Одно из требований к генераторам, особенно для автономных систем, – снижение объема, габаритов и массы. Поэтому разработка ветрогенераторов с минимальными массогабаритными показателями является важной технической задачей.

При невысокой частоте вращения лопастей турбины эффективны торцевые конструкции ветрогенераторов. Однако если для традиционных цилиндрических машин критерии выбора активной части с минимальными массогабаритными показателями выработаны, то для торцевых магнитоэлектрических машин они отсутствуют. Поэтому разработка методики рационального проектирования и конструирования таких машин в целях обеспечения минимальных массогабаритных показателей является актуальной.

Чтобы найти оптимальное конструктивное решение целесообразно выявить функциональную взаимосвязь главных размеров и размеров активной части генератора от относительного конструктивного параметра машины, ориентируясь на который становится возможным выбор размеров активной части торцевых магнитоэлектрических генераторов, соответствующих минимальным размерам, массе и объему активных материалов.

Теоретическое обоснование. При проектировании электрических машин постоянно приходится задаваться различными параметрами, принимая их из рекомендованного диапазона, полученного либо в ходе теоретических исследований, либо из опыта эксплуатации большого числа изготовленных и успешно эксплуатируемых машин. Для традиционных цилиндрических машин в качестве конструктивного параметра, определяющего рациональность конструкции машины, выступает отношение длины машины к диаметру ротора. Вероятность получения приемлемого варианта электрической машины во многом зависит от того, насколько удачно приняты эти параметры

[1, 2, 3]. Для торцевых генераторов такие рекомендации отсутствуют. Положение усложняется еще и тем, что размеры магнитной системы магнитоэлектрических машин зависят от электромагнитных нагрузок, а нагрузки, в свою очередь, зависят от размеров постоянных магнитов [4, 5, 6].

Поскольку свойства торцевых машин в значительной степени зависят от соотношения внешнего и внутреннего диаметров [7], исследуем функциональную зависимость главных размеров торцевого магнитоэлектрического генератора от конструктивного параметра a , равного отношению внешнего и внутреннего диаметров (рис. 1):

$$a = D_{\text{вн}}/D_{\text{вн}}.$$

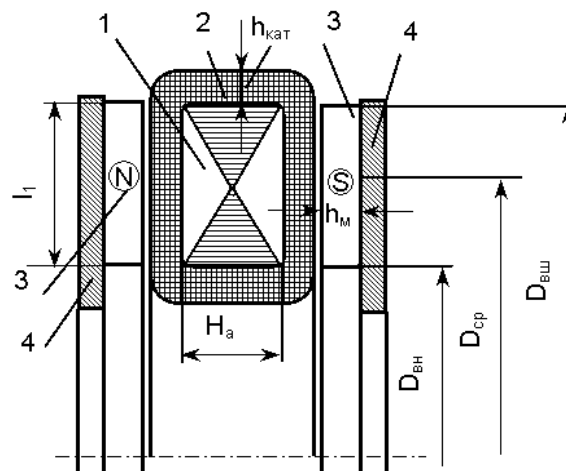


Рис. 1. Схема активной части торцевого магнитоэлектрического генератора: 1 – сердечник статора; 2 – кольцевая обмотка якоря; 3 – постоянный магнит; 4 – сердечник индуктора

В [3] приведено соотношение для внутреннего диаметра торцевого генератора:

$$D_{\text{вн}} = \sqrt[3]{\frac{0,45P_{\text{эм}}\sigma_0\alpha_1k_{ad}k_{кз}}{k_{\phi}f\pi\alpha_p B_{\text{м0}}H_{\text{мк}}(a^2-1)\lambda_{\text{м}}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{эм}}$ – расчетная (электромагнитная) мощность [8, 9]; σ_0 – коэффициент рассеяния; α_1 – коэффициент, учитывающий падение магнитного напряжения в магнитной цепи генератора в долях продольной МДС реакции якоря при коротком замыкании [10]; k_{ad} – коэффициент продольной реакции якоря; $k_{кз}$ – кратность тока короткого замыкания; k_{ϕ} – коэффициент фор-

мы поля; f – частота тока в сети; B_{M0} – индукция в нейтральном сечении магнита при холостом ходе; H_{Mk} – напряженность магнитного поля в постоянном магните при коротком замыкании; λ_m – конструктивный коэффициент, равный отношению высоты магнита к внутреннему диаметру $h_m/D_{вн}$.

Анализ соотношения (1), его развитие и конкретизация могут служить теоретической основой разработки методики выбора размеров активной части торцевых магнитоэлектрических генераторов с минимальными массой и габаритами, получения функциональной зависимости массы и объема активных материалов от выбранного конструктивного параметра генератора.

Методы и модели. Придадим формуле внутреннего диаметра (1) следующий вид:

$$D_{вн} = \sqrt[3]{\frac{0,45P_{эм}\sigma_0\alpha_1k_{ад}k_{кз}}{k_{\phi}f\pi\alpha_p B_{M0}H_{Mk}\lambda_m}} \sqrt[3]{\frac{1}{a^2-1}} = C\sqrt[3]{\frac{1}{a^2-1}} = Ck_{вн},$$

где $C = \sqrt[3]{\frac{0,45P_{эм}\sigma_0\alpha_1k_{ад}k_{кз}}{k_{\phi}f\pi\alpha_p B_{M0}H_{Mk}\lambda_m}}$ – параметр, определяемый исходными данными на проектирование торцевого генератора; $k_{вн} = \sqrt[3]{\frac{1}{a^2-1}}$ – коэффициент внутреннего диаметра.

Для внешнего $D_{вш}$ и среднего $D_{ср}$ диаметров статора, длины сердечника l_1 можно получить аналогичные зависимости:

$$D_{вш} = aD_{вн} = Ca\sqrt[3]{\frac{1}{a^2-1}} = Ck_{вш};$$

$$D_{ср} = \frac{1}{2}(D_{вш} + D_{вн}) = \frac{C}{2}\sqrt[3]{\frac{(a+1)^2}{a-1}} = Ck_{ср};$$

$$l_1 = \frac{1}{2}(D_{вш} - D_{вн}) = \frac{C}{2}\sqrt[3]{\frac{(a-1)^2}{a+1}} = Ck_l,$$

где $k_{вш} = a\sqrt[3]{\frac{1}{a^2-1}}$, $k_{ср} = \frac{1}{2}\sqrt[3]{\frac{(a+1)^2}{a-1}}$,

$k_l = \frac{1}{2}\sqrt[3]{\frac{(a-1)^2}{a+1}}$ – коэффициенты внешнего и среднего диаметров, коэффициент длины статора соответственно.

Минимальные объемы активных материалов, необходимых для изготовления торцевого магнитоэлектрического генератора, также определяются через конструктивный параметр a . Так, сечение всех $2p$ магнитов с одной стороны генератора составляет

$$S_M = \frac{\pi}{4}\alpha_p(D_{вш}^2 - D_{вн}^2) = \alpha_p\frac{\pi}{4}C^2\sqrt[3]{a^2-1},$$

где α_p – конструктивный коэффициент полюсного перекрытия; p – число пар полюсов.

По аналогии с диаметрами можно использовать коэффициент сечения магнитов с одной стороны генератора:

$$k_{S_M} = \sqrt[3]{a^2-1}.$$

Объем всех магнитов с двух сторон составляет

$$V_{маг} = 2S_M h_M = \frac{\pi}{2}\alpha_p h_M C^2\sqrt[3]{a^2-1} = \frac{\pi}{2}\alpha_p \lambda_m C^3, \quad (2)$$

где h_M – высота магнита.

Объем электротехнической стали сердечника статора равен

$$V_{ст} = S_a H_a,$$

где S_a , H_a – площадь кольца и полная высота сердечника статора соответственно.

Площадь кольца рассчитывается как

$$S_a = \frac{\pi}{4}(D_{вш}^2 - D_{вн}^2) = \frac{\pi}{4}D_{вн}^2(a^2 - 1) = \frac{\pi}{4}C^2\sqrt[3]{a^2-1}.$$

Высота сердечника статора –

$$H_a = 2h_a = 2\frac{\Phi_{\delta}}{2l_1 B_a k_c} = C\frac{B_{M0}\frac{\pi}{4}\alpha_p}{p\sigma_0 B_a k_c}\sqrt[3]{\frac{(a+1)^2}{a-1}},$$

где k_c – коэффициент заполнения сердечника статора электротехнической сталью; p – число пар полюсов.

Тогда

$$V_{ст} = S_a H_a = \frac{\pi^2\alpha_p}{32p\sigma_0 k_c}C^3(a+1). \quad (3)$$

Используя аналогичный подход, можно найти объем стали 2-х индукторов:

$$V_j = C^3\frac{\pi^2\alpha_p}{32p}(a+1). \quad (4)$$

Объем меди обмотки статора составляет

$$V_{меди} = mq_{эф}w_{\phi}l_{wcp} = m\frac{l_{ном}}{\Delta}w_{\phi}l_{wcp},$$

где m – число фаз генератора; Δ – плотность тока статора; w_{ϕ} – число витков фазы обмотки статора; l_{wcp} – средняя длина витка обмотки статора; $I_{ном} = \frac{P_{ном}}{mU_{\phi}\cos\varphi}$ – номинальный ток;

$$w_{\phi} = \frac{E_{\phi}}{4k_{\phi}f\Phi_{\delta}} = \frac{k_e U_{\phi}\sigma_0}{4k_{\phi}f\Phi_M} - \text{число витков в фазе;}$$

Φ_M – поток одного магнита.

$$\text{Средняя длина витка } l_{wcp} = 2l_1 + 2l_{лоб},$$

где $l_{лоб} = H_a + 2h_{кат} = 1,2H_a$ – длина лобовой части.

Тогда

$$V_{меди} = mq_{эф}w_{\phi}l_{wcp} = \frac{P_{эм}\sigma_0}{\Delta 2k_{\phi}fB_{M0}\alpha_p S_M / 2p}(l_1 + 1,2H_a). \quad (5)$$

Часть выражения (5), не зависящую от конструктивного параметра a , обозначим как

$$C_1 = \frac{P_{эм}\sigma_0 p}{\Delta k_{\phi} f B_{M0}}.$$

Тогда

$$V_{\text{мед}} = C_1 K_{\text{мед}} = \frac{C_1}{C} \left[\frac{2}{\alpha_p \pi} \sqrt[3]{\frac{a-1}{(a+1)^2}} + \frac{0,5}{\rho \sigma_0 k_c} \sqrt[3]{\frac{a+1}{(a-1)^2}} \right] \quad (6)$$

С учетом (2), (3), (4) и (6) объем активных материалов будет рассчитываться как

$$V_{\text{мат}} = \frac{\pi}{2} \alpha_p \lambda_m C^3 + \frac{C_1}{C} \left[\frac{2}{\alpha_p \pi} \sqrt[3]{\frac{a-1}{(a+1)^2}} + \frac{0,6}{\rho \sigma_0 k_c} \sqrt[3]{\frac{a+1}{(a-1)^2}} \right] + C^3 \frac{\pi^2 \alpha_p}{32 \rho \sigma_0 k_c} (a+1) + C^3 \frac{\pi^2 \alpha_p}{32 \rho} (a+1).$$

Если вынести за скобки C^3 и принять типичные для торцевого генератора мощностью 3 кВт значения величин C и C_1 , то объем активных материалов составит

$$V_{\text{мат}} = C^3 \left\{ \frac{\pi}{2} \alpha_p \lambda_m + 0,03 \rho \left[\frac{2}{\alpha_p \pi} \sqrt[3]{\frac{a-1}{(a+1)^2}} + \frac{0,6}{\rho \sigma_0 k_c} \sqrt[3]{\frac{a+1}{(a-1)^2}} \right] + \frac{\pi^2 \alpha_p}{32 \rho \sigma_0 k_c} (a+1) + \frac{\pi^2 \alpha_p}{32 \rho} (a+1) \right\}.$$

Выражение в фигурных скобках можно назвать коэффициентом объема активных материалов торцевого магнитоэлектрического генератора мощностью 3 кВт:

$$k_{V,\text{мат}} = \frac{\pi}{2} \alpha_p \lambda_m + 0,03 \rho \left[\frac{2}{\alpha_p \pi} \sqrt[3]{\frac{a-1}{(a+1)^2}} + \frac{0,6}{\rho \sigma_0 k_c} \sqrt[3]{\frac{a+1}{(a-1)^2}} \right] + \frac{\pi^2 \alpha_p}{32 \rho \sigma_0 k_c} (a+1) + \frac{\pi^2 \alpha_p}{32 \rho} (a+1).$$

Результаты. В соответствии с приведенными соотношениями были рассчитаны численные значения величин. Значения коэффициентов $k_{\text{вш}}$, $k_{\text{вн}}$, $k_{\text{ср}}$, k_l в зависимости от параметра a представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1. Значения коэффициентов диаметра и длины генератора от конструктивного параметра a

Отношение диаметров a	$k_{\text{вш}}$	$k_{\text{вн}}$	$k_{\text{ср}}$	k_l
1,2	1,578	1,315	1,446	0,505
1,4	1,419	1,014	1,216	0,518
1,6	1,380	0,862	1,121	0,535
1,8	1,376	0,764	1,070	0,553
2,0	1,387	0,693	1,040	0,572
2,2	1,405	0,639	1,022	0,591
2,4	1,427	0,594	1,011	0,610
2,6	1,450	0,558	1,004	0,628
2,8	1,475	0,527	1,000	0,646

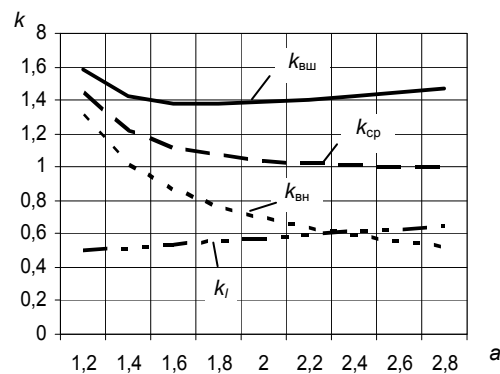


Рис. 2. Зависимости коэффициентов диаметра и длины генератора от конструктивного параметра a

На рис. 3 представлены зависимости коэффициентов объема активных материалов в функции конструктивного параметра a для различного числа пар полюсов p .

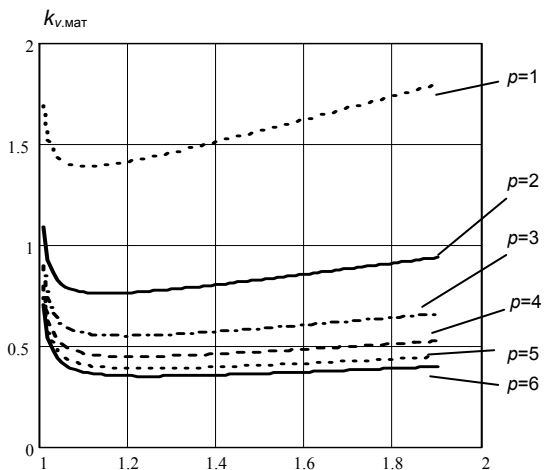


Рис. 3. Изменение коэффициента объема активных материалов в функции a для различного числа пар полюсов p

В табл. 2 приведены значения конструктивного параметра a , при которых наблюдаются локальные минимумы зависимостей $k_{V,\text{мат}} = f(a)$ при различных значениях пар полюсов генератора p , полученные с помощью встроенной функции Minimize системы Mathcad.

Таблица 2. Значения конструктивного параметра a , при котором коэффициент объема активных материалов генератора принимает минимальную величину при различных числах пар полюсов p

p	6	5	4	3	2	1
$a_{\text{опт}}$	1,246	1,232	1,213	1,187	1,153	1,104

Для проверки теоретических положений, изложенных выше, по методике, разработанной на кафедре электромеханики, были спроектированы генераторы мощностью 3 кВт ($n_1 = 500$ об/мин, $p = 6$, $U_{\text{ф}} = 220$ В при разных значениях коэффициента a). Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Масса активных материалов генератора при разных значениях коэффициента a

Конструктивный коэффициент	a		1,05	1,20	1,80
Объем стали статора	$V_{ст.стат.} \times 10^{-4}$	М ³	11,09	9,75	11,23
Объем меди	$V_{мед} \times 10^{-4}$	М ³	3,97	3,23	3,85
Объем магнитов	$V_{маг} \times 10^{-4}$	М ³	4,50	4,52	4,51
Объем стали индуктора	$V_{ст.инд} \times 10^{-4}$	М ³	12,20	10,73	12,35
Объем активных материалов	$V_{мат} \times 10^{-4}$	М ³	31,76	28,23	31,94

Анализ полученных соотношений, результатов расчета, численных значений переменных, графических функциональных зависимостей показал, что использование предложенного относительного конструктивного параметра a в виде отношения внешнего и внутреннего диаметров через установленные функциональные взаимосвязи позволяет определять оптимальные размеры активных частей торцевых магнитоэлектрических генераторов. Это обеспечивает корректный выбор конструктивного решения машины при минимальных массогабаритных показателях.

Согласно данным табл. 1 и рис. 2, коэффициент внешнего диаметра $K_{вн}$, начиная с $a = 1,4$, изменяется незначительно и при $a = 1,6-1,9$ принимает минимальное значение.

Анализ графических зависимостей (рис. 3) показывает, что коэффициент объема активных материалов для генераторов с $p = 6$, начиная с $a = 1,2$, изменяется незначительно, хотя с уменьшением числа пар полюсов зависимость становится все более значительной. При этом для каждого числа пар полюсов наблюдается свой минимум.

Анализ данных табл. 2 показывает, что значение оптимального конструктивного параметра $a_{опт}$, при котором объем активных материалов генератора минимален, возрастает от 1,104 до 1,246 при увеличении числа пар полюсов от 1 до 6.

По результатам тестового расчета выявлено, что применение предложенного подхода к разработке торцевого магнитоэлектрического генератора мощностью 3 кВт позволило определить рациональные размеры активных частей генератора, которые обеспечили снижение объема активных материалов на 13,1 % и уменьшение числа итераций при проектировании с 4 до 2 (по сравнению с $a = 1,8$).

Выводы. Использование относительно конструктивного параметра торцевых магнитоэлектрических генераторов в виде отношения внешнего и внутреннего диаметров позволяет выявить функциональные взаимосвязи главных размеров и размеров активной части генератора. Рассчитанные значения конструк-

тивного параметра, при котором объем активных материалов генератора принимает минимальную величину при различных числах пар полюсов, обеспечивают корректный выбор конструктивного решения машины при минимальных массогабаритных показателях. Использование предложенной методики позволяет сократить время поиска оптимального варианта генератора и в целом время на его проектирование.

Список литературы

1. Зечихин Б.С., Куприянов А.Д. Традиционные и компьютерные методы проектирования бесконтактных синхронных машин // *Электричество*. – 2002. – № 5. – С. 61–72.
2. Ганджа С.А. Оптимальное проектирование вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком для ветроэнергетических установок малой мощности // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2011. – № 10. – С. 78–83.
3. Шишкин В.П., Казаков Ю.Б. Определение ЭДС и главных размеров торцевых магнитоэлектрических генераторов с беспазовым сердечником статора и кольцевой обмоткой якоря // *Вестник ИГЭУ*. – 2016. – Вып. 3. – С. 63–67.
4. Осин И.Л. Синхронные электрические двигатели малой мощности. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 216 с.
5. Шевченко А.Ф., Приступ А.Г. Электрические машины с постоянными магнитами: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 64 с.
6. **Электромеханические** системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами / Ф.Р. Исмагилов, А.А. Герасин, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов. – М.: Машиностроение, 2014. – 267 с.
7. Aydin M., Huang T.A. Lipo axial flux permanent magnet disc machines: A review // URL: http://lipo.ece.wisc.edu/2004pubs/2004_10.pdf.
8. Design of the axial-flux permanent magnet coreless for the multi-megawatts wind turbine / K. Hideki, D. Yuhito, M. Koji, M. Takehisa // URL: http://proceedings.ewera.org/ewec2009/allfiles2/276_EWEC2009presentation.pdf.
9. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. – М.: Высш. шк., 1982. – 271 с.
10. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высш. шк., 1990. – 514 с.

References

1. Zechikhin, B.S., Kupriyanov, A.D. Traditsionnye i komp'yuternye metody proektirovaniya beskontaktnykh sinkhronnykh mashin [Conventional and computer methods for designing contactless synchronous machines]. *Elektrichestvo*, 2002, no. 5, pp. 61–72.
2. Gandzha, S.A. Optimal'noe proektirovanie ventily'nykh elektricheskikh mashin s aksial'nym magnitnym potokom dlya vetroenergeticheskikh ustanovok maloy moshchnosti [Optimum design of valve electric machines with an axial magnetic flux for low-power wind turbines]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*, 2011, no. 10, pp. 78–83.
3. Shishkin, V.P., Kazakov, Yu.B. Opredelenie EDS i glavnykh razmerov tortsevykh magnitoelektricheskikh generatorov s bespazovym serdechnikom

statora i kol'tsevoy obmotkoy yakorya [Determination of the EMF and the main dimensions of the end magnetoelectric generators with a stageless stator core and a ring winding of the armature]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 3, pp. 63–67.

4. Osin, I.L. *Sinkhronnye elektricheskie dvigateli maloy moshchnosti* [Synchronous electric motors of low power]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2006. 216 p.

5. Shevchenko, A.F., Pristup, A.G. *Elektricheskie mashiny s postoyannymi magnitami* [Permanent magnet electric machines]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2016. 64 p.

6. Ismagilov, F.R., Gerasin, A.A., Khayrullin, I.Kh., Vavilov, V.E. *Elektromekhanicheskie sistemy s vysoko-koertsivnymi postoyannymi magnitami* [Electromechanical systems with hard-coercivity permanent magnets]. Moscow: Mashinostroenie, 2014. 267 p.

7. Aydin, M., Huang, T.A. Lipo axial flux permanent magnet disc machines: A review. Available at: http://lipo.ece.wisc.edu/2004pubs/2004_10.pdf.

8. Hideki, K., Yuhito, D., Koji, M., Takehisa, M. Design of the axial-flux permanent magnet coreless for the multi-megawatts wind turbine. Available at: http://proceedings.ewera.org/ewec2009/allfiles2/276_EWEC2009presentation.pdf.

9. Balagurov, V.A. *Proektirovanie spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka* [Designing of special alternating current electric machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 271 p.

10. But, D.A. *Beskontaktnye elektricheskie mashiny* [Non-contact electrical machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. 514 p.

Шишкин Валерий Павлович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-47.

Shishkin Valery Pavlovich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Professor of the Electromechanics Department
tel.: (4932) 26-97-47.

Казakov Юрий Борисович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06.

Kazakov Yuri Borisovich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral Degree), Professor, Head of the Electromechanics Department
tel.: (4932) 26-97-06

УДК 621.313.001.63

Применение символического метода к расчету цепей с вращающимися асинхронными машинами

В.А. Мартынов, А.Н. Голубев

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail:zav@toe.ispu.ru, alenikgo@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: При анализе симметричных трехфазных цепей синусоидального тока, содержащих асинхронные двигатели, рассматривается приведенная машина с неподвижным ротором, в которой токи статора и ротора изменяются с одинаковыми частотами. При нарушении симметрии напряжения на зажимах машины будут обусловлены токами всех ветвей статора и ротора. При этом определение элементов матрицы комплексных сопротивлений вращающейся машины становится проблематичным и может быть произведено только на основе магнитного поля в активной зоне. Это является одной из основных причин, почему к расчету несимметричных режимов работы трехфазных цепей до сих пор применяют метод симметричных составляющих. В связи с этим поиск теоретических подходов к определению метода расчета элементов матрицы комплексных сопротивлений асинхронной машины с уровнем вычислительных затрат, приемлемым для многовариантных расчетов в симметричных и несимметричных режимах с учетом дискретности и несимметрии структуры обмоток, наведенных токов и взаимного перемещения зубчатых сердечников, является актуальным направлением исследований.