

УДК621.313

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-60-65

Проектирование вентильно-индукторных генераторов: машинная постоянная и выбор главных размеров

В.Б. Баль, Аунг Минт Тун

Проектирование электрических машин с помощью машинной постоянной применяется уже более 100 лет. Машинная постоянная позволяет выбирать объем активных частей машины заданной мощности и заданной скорости вращения на основе выбранных электромагнитных нагрузок. На основе уже известного объема нетрудно определить главные размеры машины. На основе многолетнего опыта проектирования создана база значений машинной постоянной, которая используется для проектирования электрических машин традиционного типа.

Традиционная машинная постоянная зависит не только от электромагнитных нагрузок, но и от конструкции машины, используемых материалов, типа системы охлаждения и ряда других факторов. Таким образом, традиционную машинную постоянную нельзя использовать при проектировании новых конструкций электрических машин и при сравнении характеристик электрических машин разных типов. Машинная постоянная является отношением объема активных частей к моменту машины (удельным объемом машины) и применяется для сравнения машин разных типов при условии исключения влияния на нее конструктивных факторов.

Предложена новая машинная постоянная, в которой вместо традиционной линейной нагрузки используется напряженность магнитного поля рабочего зазора. Представленная машинная постоянная может использоваться как для проектирования машин различных типов, так и для сравнения удельных параметров электрических машин, в том числе вариантов их конструктивных исполнений.

В результате теоретических исследований и практических расчетов получены зависимости машинной постоянной индукторных машин с различной зубцовой геометрией, при разных электромагнитных нагрузках. Показано, что в широком диапазоне изменения относительных параметров зубцовой зоны индукторной машины при одинаковых электромагнитных нагрузках предложенная постоянная практически неизменна.

Ключевые слова: вентильно-индукторный генератор, машинная постоянная, напряженность магнитного поля, электромагнитная и линейная нагрузки.

Для цитирования: Баль В.Б., Аунг Минт Тун. Проектирование вентильно-индукторных генераторов: машинная постоянная и выбор главных размеров // Вестник МЭИ. 2018. № 3. С. 60—65. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-60-65.

Designing Switched Reluctance Generators: The Machine Constant and Choice of the Main Dimensions

V.B. Bal, Aung Myint Tun

The approach to designing electrical machines involving the use of a machine constant has been applied for already more than a century. By using the machine constant, the designer can select the volume of active parts for a machine of the preset capacity and rotation frequency proceeding from the chosen electromagnetic loads. Given the known volume of the machine active parts, the machine main sizes can be determined in a quite straightforward manner. A bank of machine constant values has been set up based on the experience gained for many years of engineering activities, which is used for designing electrical machines of conventional types.

The conventional machine constant depends not only on the electromagnetic loads, but also on the machine mechanical design, applied materials, cooling system type, and a number of other factors. However, the conventional machine constant cannot be used in developing new designs of electrical machines, nor can it be used for comparing the characteristics of electrical machines of different types. The machine constant is defined as the ratio of the volume of machine active parts to the machine torque (the machine specific volume) and can be used for comparing machines of different types provided that the effect of design factors on its value is excluded.

A new machine constant is proposed, in which the magnetic field strength in the machine air gap is used instead of the conventionally used electric loading. The proposed machine constant can be applied in designing machines of different types and for comparing the specific parameters of electrical machines, including their design modifications.

Theoretical investigations and engineering calculations were carried out, the results of which were used to obtain the dependences of machine constant for reluctance machines having different tooth geometries and at different electromagnetic loads. It is shown that the proposed machine constant remains almost unchanged in a wide variation range of the reluctance machine tooth zone relative parameters at identical electromagnetic loads.

Key words: switched reluctance generator, machine constant, magnetic field strength, electromagnetic load, electric loading.

For citation: Bal V.B., Aung Myint Tun. Designing Switched Reluctance Generators: The Machine Constant and Choice of the Main Dimensions. MPEI Vestnik. 2018;3:60—65. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-60-65.

Вентильно-индукторные генераторы появились около 25 лет назад. Принципы их проектирования до сих пор отработаны далеко не полностью, поэтому, задача совершенствования методов проектирования вентильно-индукторных генераторов чрезвычайно актуальна.

Конструктивно вентильно-индукторный генератор представляет собой индукторную электрическую машину без возбуждения, фазы которой связаны с электронным коммутатором (рис. 1).

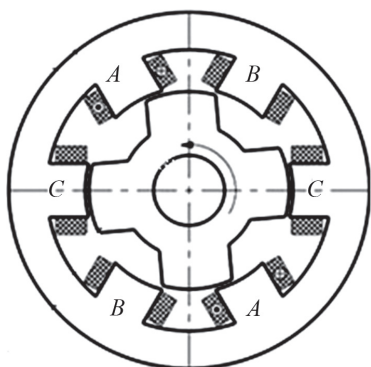


Рис. 1. Вентильно-индукторный генератор

В качестве примера на рис. 2. приведены две электрические машины с одинаковыми числом и шириной полюсов и площадью пазов обмоток (суммы токов обмоток одинаковы). Линейные нагрузки машин за счет разных диаметров расточки статора отличаются.

По принципу действия генератор является шаговым двигателем, работающим в генераторном режиме. Все известные принципы проектирования традиционных индукторных машин могут быть применены для проектирования генераторов такого типа. Однако, известные методы проектирования имеют ряд недостатков.

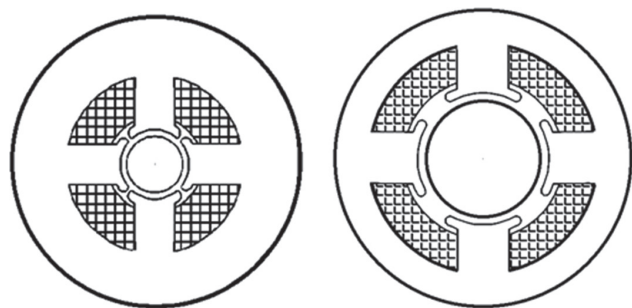


Рис. 2. Конструктивные исполнения электрической машины с одинаковой площадью пазов обмоток

Традиционно проектирование электрической машины начинается с выбора главных размеров, внутреннего диаметра D_1 и длины магнитопровода статора l . Большинство расчетных методик использует для выбора главных размеров машинную постоянную Арнольда, связывающую объем внутренней расточки статора $D_1^2 l$ электрической машины с частотой вращения n и расчетной мощностью P' с электромагнитными нагрузками машины A и B_δ [1]

$$C_A = \frac{D_1^2 l n}{P'} = \frac{2}{\alpha_\delta k_\phi k_{\text{об1}} A B_\delta}, \quad (1)$$

где α_δ — коэффициент полюсного перекрытия; k_ϕ — коэффициент формы кривой магнитного поля в воздушном зазоре; $k_{\text{об1}}$ — обмоточный коэффициент; A — линейная нагрузка; B_δ — магнитная индукция в воздушном зазоре.

Индукторная машина не исключение, постоянная Арнольда используется при выборе главных размеров индукторных генераторов [2]. Вместе с тем применение постоянной Арнольда сопряжено со следующими трудностями. В машинах со средоточенными обмотками (индукторные машины в своем большинстве имеют сосредоточенные обмотки) соотношение между шириной полюсов и расстоянием между ними не всегда одинаковое. От этого зависит величина линейной нагрузки, которая варьируется за счет изменения диаметра машины при изменении геометрии магнитопровода.

При изменении рабочего зазора машины и сохранении диаметра расточки статора постоянным, будут меняться требуемая магнитодвижущая сила (МДС) обмотки статора и, соответственно, линейная нагрузка и величина постоянной Арнольда.

Применение постоянной Арнольда к машинам с двойным зазором или линейным машинам невозможно, так как трудно связать понятие удельного момента машины с двойным зазором с внутренним объемом внешнего статора, в котором расположен внутренний статор, а для линейной машины термин внутренний объем статора ничего не означает.

Трудности применения постоянной Арнольда обусловлены использованием линейной нагрузки A в качестве одной из электромагнитных нагрузок. Этот недостаток может быть устранен заменой в машинной постоянной линейной нагрузки на напряженность магнитного поля H .

Для машины переменного тока расчетная мощность равна [3]

$$P' = mk_i^2 I_1 E_1 = kP_H, \quad (2)$$

где m — число фаз; I_1, E_1 — ток и ЭДС фазы обмотки статора [4, 5]; k_i^2 — коэффициент использования фазного тока (для вентильных машин) [6].

$$E = 4k_B f w_1 k_{об1} \Phi_m = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 k_{01} \Phi_m, \quad (3)$$

где $k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ — коэффициент формы кривой магнитной индукции для гармонического магнитного поля; f, w_1 — частота тока и число витков фазы; Φ_m — максимальное значение магнитного потока фазы.

Амплитуда первой гармоники МДС фазы обмотки выглядит как [5]

$$F_1 = \frac{m\sqrt{2}w_1 k_{об1}}{\pi p} I_1, \quad (4)$$

где m — число фаз; p — число пар полюсов.

После подстановки (3), (4) в (2) получим выражение мощности машины через магнитный поток и МДС обмотки

$$P' = \pi^2 p f \Phi_m F_1 = \frac{\pi}{2} \omega \Phi_\Sigma F_1, \quad (5)$$

где $\Phi_\Sigma = p\Phi_m$ — суммарный магнитный поток всех полюсов машины; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота

Момент машины равен

$$M = \frac{P'}{\omega} = \frac{\pi}{2} \Phi_\Sigma F_1. \quad (6)$$

Уравнения (5), (6) универсальны, поскольку не содержат ни обмоточного коэффициента, ни коэффициента формы поля и могут с некоторыми уточнениями применяться для любого типа электрических машин. Суммарный магнитный поток Φ_Σ в (5), (6) определяет ЭДС E_1 , наводимую в обмотке якоря машины, и является суммарным магнитным потоком возбуждения (магнитным потоком ротора в традиционной синхронной машине). Магнитодвижущая сила F_1 — это МДС реакции якоря, пропорциональная его току I_1 . В индукторной электрической машине F_1 — также МДС реакции якоря, а Φ_Σ — переменная составляющая магнитного потока машины (в индукторной машине ЭДС якоря пропорциональна Φ_Σ).

Заменив в (6) магнитный поток Φ_Σ и МДС F_1 на магнитную индукцию B_δ и напряженность магнитного поля H_1 через выражения $\Phi_\Sigma = B_\delta S_\Sigma = B_\delta 2pb_n l_\delta$ и $F_1 = H_1 \delta$, где S_Σ — суммарная площадь всех полюсов машины; δ — рабочий зазор; b_n — ширина полюса, и перенеся произведение $2pb_n l_\delta$ в левую часть уравнения, получим машинную постоянную

$$C_M = \frac{P'}{2pb_n l_\delta \delta \omega} = \frac{\pi}{2} B_\delta H_1. \quad (7)$$

Машинная постоянная (7) представляет собой коэффициент использования машины (удельный момент

машины), отношение момента к объему $2pb_n l_\delta \delta$ и объему рабочего зазора под полюсами машины в зависимости от электромагнитных нагрузок: магнитной индукции поля возбуждения машины B_δ и напряженности магнитного поля реакции якоря H_1 . Машинная постоянная (7) имеет сходство с машинной постоянной Эссона [1, 7], в которой линейная нагрузка A заменена на напряженность магнитного поля H_1 . Замена правомерна, поскольку оба параметра связаны друг с другом. Линейная нагрузка равна [3, 8]

$$A = \frac{2I_1 w_1 m}{\pi D}. \quad (8)$$

Заменив в (8) I_1 на F_1 по (4), учитывая, что $\pi D/2p = \tau$, а $F_1 = H_1 \delta$, получим зависимость линейной нагрузки от напряженности магнитного поля

$$A = \frac{\pi}{k_{об1} \sqrt{2}} H_1 \frac{\delta}{\tau}. \quad (9)$$

Обратная величина постоянной (7) представляет собой удельный объем машины и отношение объема рабочего зазора к моменту машины

$$C'_M = \frac{1}{C_M} = \frac{2pb_n l_\delta \delta \omega}{P'} = \frac{2}{\pi B_\delta H_1}. \quad (10)$$

Машинная постоянная (10) имеет сходство с машинной постоянной Арнольда (1) и не имеет ее недостатков, поскольку напряженность магнитного поля H_1 не зависит от величины зазора машины и конфигурации ее магнитной системы. Машинная постоянная (7) также лишена этих недостатков.

Постоянные (7), (10) могут быть использованы для линейных машин. Учитывая, что $P' = F_c V$, где F_c — тяговое усилие линейной машины; V — линейная скорость перемещения, $V = 2\tau f$, $\omega = 2\pi f$, получим выражение машинной постоянной для линейных машин

$$C'_{МЛ} = \frac{1}{C_{МЛ}} = \frac{2pb_n l_\delta \delta \pi}{F_c \tau} = \frac{2}{\pi B_\delta H_1}. \quad (11)$$

Машинная постоянная для линейных машин пропорциональна отношению объема рабочего зазора $2pb_n l_\delta \delta$ к произведению тягового усилия машины на величину полюсного деления $F_c \tau$. Выражение (11) можно упростить, заменив F_c на удельное тяговое усилие $f_c = F_c / S_\Sigma = F_c / 2pb_n l_\delta$.

$$C'_{МЛ} = \frac{1}{C_{МЛ}} = \frac{\pi \delta}{f_c \tau} = \frac{2}{\pi B_\delta H_1}. \quad (12)$$

В индукторных машинах магнитное поле в рабочем зазоре определяется суммарной МДС обмотки возбуждения и обмотки якоря. Складываются МДС обмоток всегда арифметически, а не векторно, как в традиционной синхронной машине, поскольку конфигурация магнитного поля в зазоре индукторной машины определяется только зубцовой геометрией.

Для индукторных машин магнитная индукция B_δ соответствует переменной составляющей магнит-

ного потока рабочего зазора Φ_Σ , $\Phi_\Sigma = F_0 \Lambda_\Sigma$, где F_0 — среднее значение МДС рабочего зазора индукторной машины; Λ_Σ — переменная составляющая суммарной магнитной проводимости рабочего зазора (магнитной проводимости всех полюсов машины). Поскольку $\Phi_\Sigma = B_\delta S_\Sigma$, а $F_0 = H_0 \delta$, где H_0 — среднее значение напряженности магнитного поля рабочего зазора, $\Lambda_\Sigma = \lambda_1 \mu_0 2pz l_\delta = \lambda_1 \mu_0 2p(b_p/\tau) l_\delta = \lambda_1 \mu_0 (S_\Sigma/\tau)$ [7, 9], где λ_1 — удельная переменная составляющая магнитной проводимости рабочего зазора; z — число зубцов полюса индукторной машины; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума. Магнитную индукцию в зазоре можно представить в виде

$$B_\delta = H_0 \lambda_1 \mu_0 \frac{\delta}{\tau}. \quad (13)$$

Напряженность магнитного поля реакции якоря H_1 можно принять равной H_0 по следующим причинам. В индукторных машинах без возбуждения, к которым относятся и вентильно-индукторные генераторы, можно приближенно принять, что ток в фазе обмотки протекает половину периода, а в другой половине периода фаза обесточена [10]. При этом ток и МДС фазы, а, соответственно, и напряженность магнитного поля в зазоре можно представить в виде суммы двух составляющих: постоянной и переменной. Постоянная составляющая напряженности магнитного поля это H_0 , а переменная — H_1 , амплитуда которой численно равна H_0 . Для индукторных машин с возбуждением амплитуда переменной составляющей напряженности магнитного поля H_1 может принимать любое значение по отношению к H_0 , но в этом случае равенство H_1 и H_0 соответствует максимальной мощности машины, поэтому для задач проектирования принятие равенства H_1 и H_0 целесообразно в любом случае, тогда выражение (10) может быть представлено в виде

$$C'_M = \frac{1}{C_M} = \frac{2pb_p l_\delta \delta \omega}{P'} = \frac{2\tau}{\pi H_0^2 \lambda_1 \mu_0 \delta}. \quad (14)$$

Учитывая, что в воздушном зазоре напряженность магнитного поля и магнитная индукция связаны соотношением $B_0 = \mu_0 H_0$

$$C'_M = \frac{1}{C_M} = \frac{2pb_p l_\delta \delta \omega}{P'} = \frac{2\mu_0 \tau}{\pi B_0^2 \lambda_1 \delta} = \frac{8\tau}{B_0^2 \lambda_1 \delta} \cdot 10^{-7}. \quad (15)$$

Выражение (15) удобно для расчета машинной постоянной, поскольку для каждого значения τ/δ необходимо найти одно соответствующее ему значение удельной магнитной проводимости λ_1 , которое приводится в [2], или может быть рассчитано с помощью программы для расчета магнитных полей.

Кривые машинной постоянной в зависимости от τ/δ для различных значений средней магнитной индукции в рабочем зазоре индукторной машины B_0 и относительной ширины зубца b_z/τ приведены на рис. 3. Магнитные проводимости λ_1 , необходимые для расчета машинной постоянной C'_M , были получены с помощью программы FEMM.

Машинная постоянная C_M имеет широкий диапазон значений τ/δ (от 30 до 150 и более), охватывающий практически всю область значений τ/δ , используемую в индукторных машинах. Только при τ/δ меньше 25...30 C_M начинает увеличиваться за счет уменьшения модуляции магнитной проводимости рабочего зазора (уменьшения переменной составляющей магнитной проводимости зазора по сравнению с постоянной).

Для сравнения машинной постоянной C_M с постоянной Арнольда C_A , необходимо заменить линейную нагрузку A в (1) на напряженность магнитного поля H_1 с помощью (9). Затем, используя те же соотношения, что и для вывода (15), получим выражение для постоянной Арнольда в следующем виде

$$C_A = \frac{4\sqrt{2}\tau^2}{B_0^2 \lambda_1 \delta^2} \cdot 10^{-7}. \quad (16)$$

Зависимости постоянной Арнольда C_A (16) в зависимости от τ/δ изображены на рис. 4.

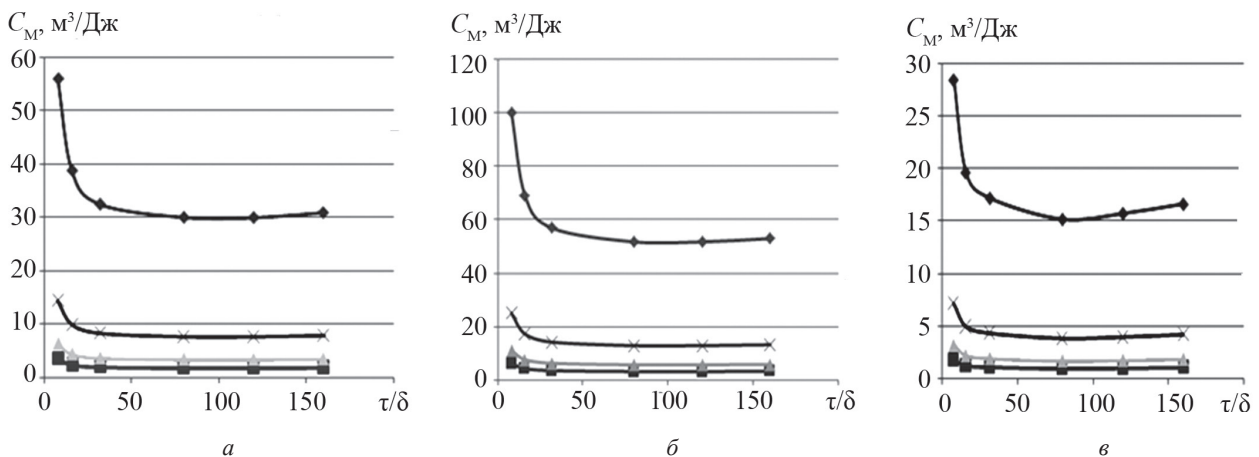


Рис. 3. Машинная постоянная C_M в зависимости от τ/δ для различной относительной ширины зубца:

$b_z/\tau = 0,6$ (а), $0,5$ (б), $0,4$ (в); $B_0 = 1,0$ (■), $0,75$ (▲), $0,50$ (×), $0,25$ (◆) Тл

Как следует из рис. 4 C_A не остается постоянной при изменении τ/δ . Это объясняется значительной зависимостью линейной нагрузки A , требуемой для обеспечения необходимой магнитной индукции в рабочем зазоре, от величины рабочего зазора δ .

Проектирование вентильно-индукторного генератора как традиционным образом, так и с помощью новой машинной постоянной начинается с выбора электромагнитных нагрузок. Для индукторной машины достаточно выбрать одну электромагнитную нагрузку, поскольку в (15) электромагнитная нагрузка (средняя магнитная индукция в зазоре B_0) представлена в квадратной степени [11]. С ростом B_0 увеличивается коэффициент насыщения магнитной цепи (отношение МДС магнитной цепи машины к МДС рабочего зазора), что приводит к росту требуемой МДС обмотки, увеличению потерь в стали и снижению КПД машины. Коэффициент насыщения обычно выбирается равным не более 1,2...1,4. Коэффициенты насыщения k_n в зависимости от B_0 для различных соотношений τ/δ приведены на рис. 5 и могут быть использованы для выбора электромагнитных нагрузок.

С помощью машинной постоянной (15) можно выбрать требуемый объем рабочего зазора и главные размеры: D , l и δ . Известное оптимальное соотношение между D и l $\lambda = D/l$ [1] для синхронных и асинхронных электрических машин можно использовать и для индукторных машин. Оно позволяет объединить D и l в один параметр — площадь рабочего зазора $S_\Sigma = \pi D l$. Рекомендуется выбирать λ в пределах от 1 до 3 [1]. При увеличении S_Σ увеличиваются размеры магнитопровода, а значит растут масса и потери в стали магнитопровода. Одновременно, с уменьшением δ снижа-

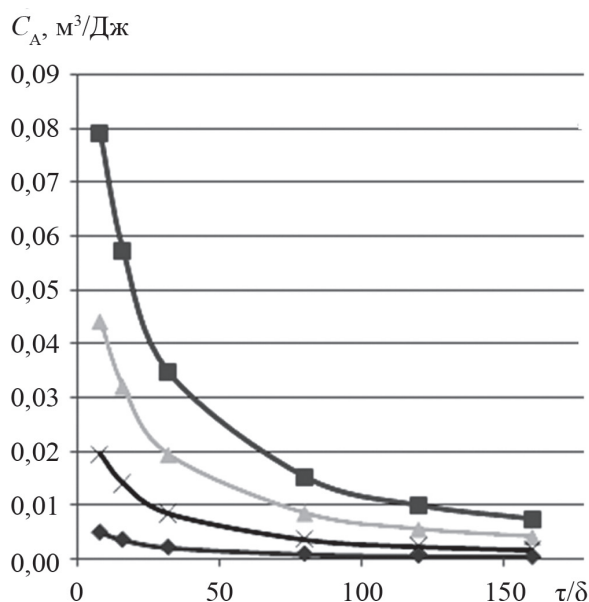


Рис. 4. Машинная постоянная C_A в зависимости от τ/δ при $b_z/\tau = 0,5$:

$B_0 = 1,0$ (■), $0,75$ (▲), $0,50$ (×), $0,25$ (◆) Тл

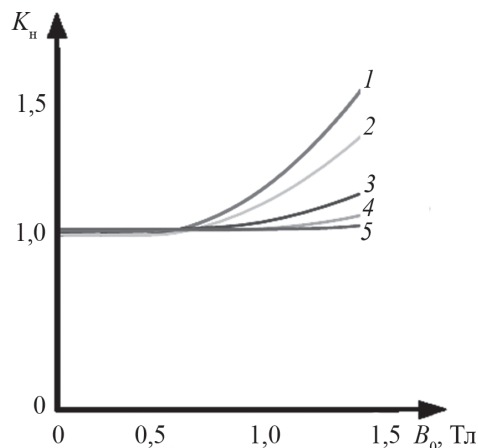


Рис. 5. Коэффициент насыщения магнитной цепи в зависимости от τ/δ :

$\tau/\delta = 150$ (1); 100 (2); 50 (3); 30 (4); 10 (5)

ются масса и потери в обмотке. Соотношение между δ и S_Σ можно выбрать по критерию оптимальности минимума массы машины или максимума КПД. Затем, по известным методикам проводится выбор остальных размеров машины с учетом выбранной плотности тока в обмотке и системы охлаждения.

Таким образом, представленная методика расчета машинной постоянной может быть использована для расчета машинной постоянной электрических машин различных типов. Предложенная машинная постоянная универсальна, поскольку не зависит от конструктивных различий электрических машин и послужит как для проектирования машин различных типов, так и для сравнения удельных параметров электрических машин, в том числе вариантов их конструктивных исполнений.

В результате теоретических исследований и практических расчетов получены зависимости машинной постоянной индукторных машин с различной зубцовой геометрией при различных электромагнитных нагрузках. Показано, что в широком диапазоне изменения относительных параметров зубцовой зоны индукторной машины при одинаковых электромагнитных нагрузках предложенная машинная постоянная практически постоянна.

Литература

1. Проектирование электрических машин. М.: Юрайт, 2017.
2. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. М.: Высшая школа, 1982.
3. Гольдберг О.Д., Макаров Л.Н., Хелемская С.П. Инженерное проектирование электрических машин. М.: Бастет, 2016.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
5. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Юрайт, 2015.

6. **Фисенко Г.С., Попов А.Н.** Проектирование вентильных индукторных двигателей. М: Изд-во МЭИ, 1995.

7. **Вакурин В.** Электрические машины. М: Лань, 2016.

8. **Алиев И.И.** Электрические машины. М: Радио Софт, 2014.

9. **Gerling D.** Electrical Machines Mathematical Fundamentals of Machine Topologies. Stuttgart: Springer, 2014.

10. **Janardanan E.G.** Special Electrical Machines. Palakkad: PNI Learning Pvt. Ltd., 2014.

11. **Saurabh Kumar Mukerji, Yatendra Pal Singh, Ahmad Shahid Khan.** Electromagnetics for Electrical Machines. London — N.-Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group LLC Boca Ration, 2015.

References

1. **Proektirovanie** Elektricheskikh Mashin. М.: Yurayt, 2017. (in Russian).

2. **Balagurov V.A.** Proektirovanie Spetsial'nyh Elektricheskikh Mashin Peremennogo Toka. М.: Vysshaya Shkola, 1982. (in Russian).

3. **Gol'dberg O.D., Makarov L.N., Helemskaya S.P.** Inzhenernoe Proektirovanie Elektricheskikh Mashin. М.: Bastet, 2016. (in Russian).

4. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** Elektricheskije Mashiny. М.: Izdatel'skiy Dom MPEI, 2006. (in Russian).

5. **Kopylov I.P.** Elektricheskije Mashiny. М: Yurayt, 2015. (in Russian).

6. **Fisenko G.S., Popov A.N.** Proektirovanie Ventil'nyh Induktornyh Dvigatelye. М: Izd-vo MPEI, 1995. (in Russian).

7. **Vakurin V.** Elektricheskije Mashiny. М: Lan', 2016. (in Russian).

8. **Aliiev I.I.** Elektricheskije Mashiny. М: Radio Soft, 2014. (in Russian).

9. **Gerling D.** Electrical Machines Mathematical Fundamentals of Machine Topologies. Stuttgart: Springer, 2014.

10. **Janardanan E.G.** Special Electrical Machines. Palakkad: PNI Learning Pvt. Ltd., 2014.

11. **Saurabh Kumar Mukerji, Yatendra Pal Singh, Ahmad Shahid Khan.** Electromagnetics for Electrical Machines. London — N.-Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group LLC Boca Ration, 2015.

Сведения об авторах

Баль Владимир Борисович — кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ», e-mail: balvb@mpei.ru

Аунг Минт Тун — аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ», e-mail: jucoyel12@gmail.com

Information about authors

Bal Vladimir B. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Dept., NRU MPEI, e-mail: balvb@mpei.ru

Aung Myint Tun — Ph.D.-student of Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Dept., NRU MPEI, e-mail: jucoyel12@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25.08.2017