

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ANSYS MAXWELL ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Н.И. Неустроев, А.А. Котов, И.Е. Куесш

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В данной работе рассмотрен вопрос количественной оценки эффекта вытеснения тока в шинах, уложенных в пазах электрических машин переменного тока на примере магнитоэлектрического генератора большой мощности. Также указаны основные аспекты, оказывающие влияние на увеличение эффекта вытеснения тока в шинах электрических машин. Приведены примеры расчетов среднего увеличения сопротивления шины по методикам, описанным в классической литературе и проверенных годами при проектировании стандартных электрических машин переменного тока. Также был рассмотрен вопрос моделирования электромагнитных процессов в системе автоматического проектирования ANSYS Maxwell. Особое внимание уделено возможностям программного обеспечения ANSYS Maxwell в части графического представления информации по результатам моделирования работы электромеханических преобразователей. Приведена графическая интерпретация результатов моделирования работы генератора, упрощающая понимание физических основ оговариваемых явлений, а также упрощающих взаимодействие с программным обеспечением. Проведено сравнение двух указанных способов количественной оценки эффекта вытеснения тока на основании экспериментальных данных, полученных силами АО «НПО «Электромашина», снятых с макетных образцов рассчитанного магнитоэлектрического генератора большой мощности. На основании результатов сравнения двух способов количественной оценки эффекта вытеснения тока в обмотке магнитоэлектрического генератора переменного тока сделано заключение о наиболее предпочтительном способе расчета суммарных электрических потерь в обмотках электромеханических преобразователей. Также был рассмотрен вопрос потерь в магнитоэлектрических генераторах большой мощности, существенно влияющих на коэффициент полезного действия электрической машины. Оговорено условие максимального коэффициента полезного действия электрической машины большой мощности.

Ключевые слова: электрическая машина, эффект вытеснения тока, система автоматического проектирования, ANSYS Maxwell, коэффициент полезного действия.

Введение

В настоящее время проектирование электрических машин достаточно автоматизировано. Связано это с ростом промышленных мощностей и конкуренцией на рынке. Проектирование требуется производить быстро и точно, с минимальными погрешностями.

На АО «НПО «Электромашина» был разработан генератор переменного тока, работающий в паре с выпрямителем, номинальной мощностью 1000 кВт. Краткие характеристики проектируемого генератора приведены в таблице.

Машина подобного рода обладает следующими основными видами потерь [1]:

- магнитные потери на перемагничивание, гистерезис и вихревые токи в стали статора;
- электрические потери в обмотке статора, вызванные протеканием тока нагрузки.

Остальные потери, такие как: поверхностные потери в постоянных магнитах вследствие зубцовости статора, механические потери в подшипниках, потери на трение ротора о воздух и т. д., в данной статье будут опущены, ввиду их малой величины в сравнении с основными потерями и небольшого влияния на суммарный КПД электрической машины [2, 3].

Электромагнитный расчет производился двумя методами. По классическим методикам, с ис-

Краткие характеристики проектируемого генератора

| Параметр | Номинальная выходная электрическая мощность (после выпрямителя) | Номинальный ток нагрузки (после выпрямителя) | Частота вращения вала генератора | Номинальное напряжение постоянного тока (после выпрямителя) | Напряжение холостого хода, не более |
|----------|---|--|----------------------------------|---|-------------------------------------|
| Ед. изм. | кВт | А | Об/мин | В | В |
| Знач. | 1000 | 1100 | 2100 | 900 | 1200 |

пользованием пакета Mathcad на основе методической литературы [4]. И методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS Maxwell.

Согласно проведенным расчетам, КПД полученного генератора составляет 97 %. Из 30 кВт суммарных основных потерь (без учета эффекта вытеснения тока) 15 кВт потерь, по расчетам, составляют магнитные, и 15 кВт составляют электрические потери. Полученный результат соответствует условию работы машины с максимальным КПД, как показано ниже.

Условие работы электрической машины с максимальным КПД

Запишем коэффициент полезного действия через коэффициент нагрузки:

$$\eta(k_{нг}) = \frac{k_{нг} P_{2н}}{k_{нг} P_{2н} + P_{маг} + k_{нг}^2 P_{эл}}, \quad (1)$$

где $k_{нг} = P_2/P_{2н}$ – коэффициент нагрузки электрической машины (при неизменном напряжении то же, что отношение текущей токовой нагрузки к номинальной, то есть $k_{нг} = I_2/I_{2н}$);

$P_{2н}$ – номинальная выходная мощность (прямо пропорциональна коэффициенту нагрузки, так как мощность от тока зависит практически линейно);

$P_{маг}$ – магнитные потери при номинальной нагрузке (от тока практически не зависят, поэтому множитель отсутствует);

$P_{эл}$ – электрические потери при номинальной нагрузке (зависят от тока нагрузки во второй степени, поэтому множитель во второй степени).

Условием максимума функции коэффициента полезного действия электрической машины является равенство нулю производной данной функции [5, 6].

Запишем производную функции КПД и определим условие равенства ее нулю:

$$\eta^{(k_{нг})} = \frac{P_{2н} (k_{нг} P_{2н} + P_{маг} + k_{нг}^2 P_{эл}) - k_{нг} P_{2н} (P_{2н} + 2k_{нг} P_{эл})}{(k_{нг} P_{2н} + P_{маг} + k_{нг}^2 P_{эл})^2} = 0. \quad (2)$$

Из условия равенства производной нулю, получаем:

$$P_{2н} (k_{нг} P_{2н} + P_{маг} + k_{нг}^2 P_{эл}) - k_{нг} P_{2н} (P_{2н} + 2k_{нг} P_{эл}) = 0; \quad (3)$$

$$k_{нг}^2 = \frac{P_{маг}}{P_{эл}}. \quad (4)$$

Следовательно, при номинальной нагрузке, когда коэффициент нагрузки равен единице, условием максимума КПД будет являться равенство магнитных и электрических потерь. Строго говоря, в общем виде зависимость КПД от коэффициента нагрузки является более сложной, однако было

оговорено принимать в расчет лишь основные (существенно влияющие на КПД) потери электрической машины (электрические и магнитные).

Таким образом, рассчитанный генератор имеет максимальный КПД 97 % в точке, соответствующей номинальной мощности.

С целью проверки расчетов на наличие грубых ошибок проводится моделирование работы проектируемого изделия в среде ANSYS Maxwell.

Моделирование работы генератора в ANSYS Maxwell

При расчете генератора в пакете ANSYS Maxwell была создана двумерная модель генератора (разрез поперек оси вала), скриншот из программы представлен на рис. 1.

Магниты в модели намагничиваются по осям относительных систем координат, которые создаются отдельно для каждого магнита и вращаются вместе с ротором. Обмотка в модели соединяется в катушки, а катушки в фазы [7, 8].

Фазы обмотки соединены в многоугольник и подключены к девятифазному мостовому двухполупериодному выпрямителю, как показано на рис. 2. В схему также подключены элементы, обозначающие активные сопротивления и индуктивности рассеяния лобовых частей обмотки, которые можно получить из расчета электрической машины в подпрограмме RMXprt Desing или ориентировочным расчетом с применением стандартных методов [9, 10].

В процессе моделирования работы генератора в пакете ANSYS Maxwell сначала была рассмотрена работа генератора в режиме холостого хода [11, 12]. Так как генератор магнитоэлектрический, для регулирования напряжения на выходе генератора необходимо изменять частоту вращения его вала. В связи с этим имеет смысл провести расчет выходного напряжения генератора при холодных магнитах (20 °С) и при нагретых. Осциллограмма напряжения при работе с холодными магнитами показана на рис. 3. Было получено значение 1130 В.

Производитель постоянных магнитов нормирует уменьшение параметра остаточной индукции Вг на каждые 100 °С не более 15 %. Таким образом, имея поверочный тепловой расчет, можно рассчитать лишь минимально возможное напряжение [13]. При этом точно оценить уменьшение потока возможно лишь эмпирическим путем, так как второй предел уменьшения потока производитель не ограничивает. С использованием данных теплового расчета было проведено моделирование работы генератора на холостом ходу с нагретыми магнитами [14]. Осциллограмма напряжения изображена на рис. 4. Было получено значение 1064 В.

Далее в пакете ANSYS Maxwell был проверен номинальный режим работы генератора. Осциллограммы напряжения и тока представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

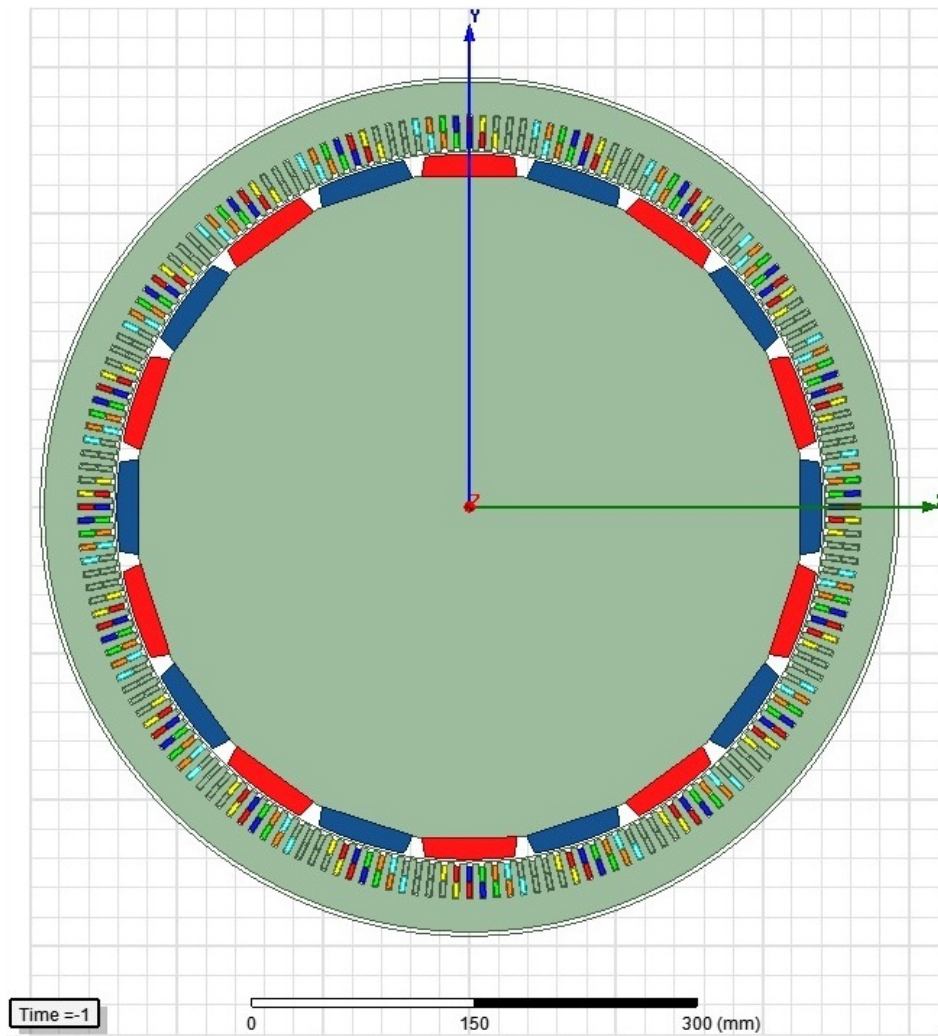


Рис. 1. Двухмерная модель проектируемого генератора в программе ANSYS Maxwell

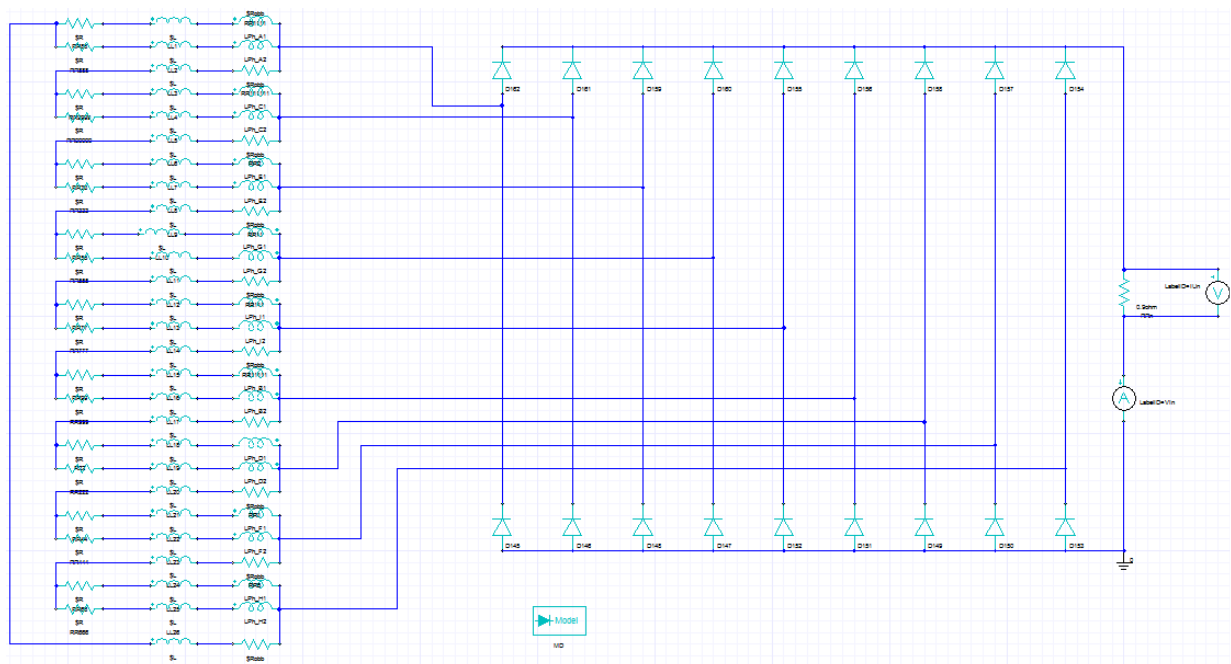


Рис. 2. Схема соединения обмотки генератора и подключения выпрямителя к нагрузке

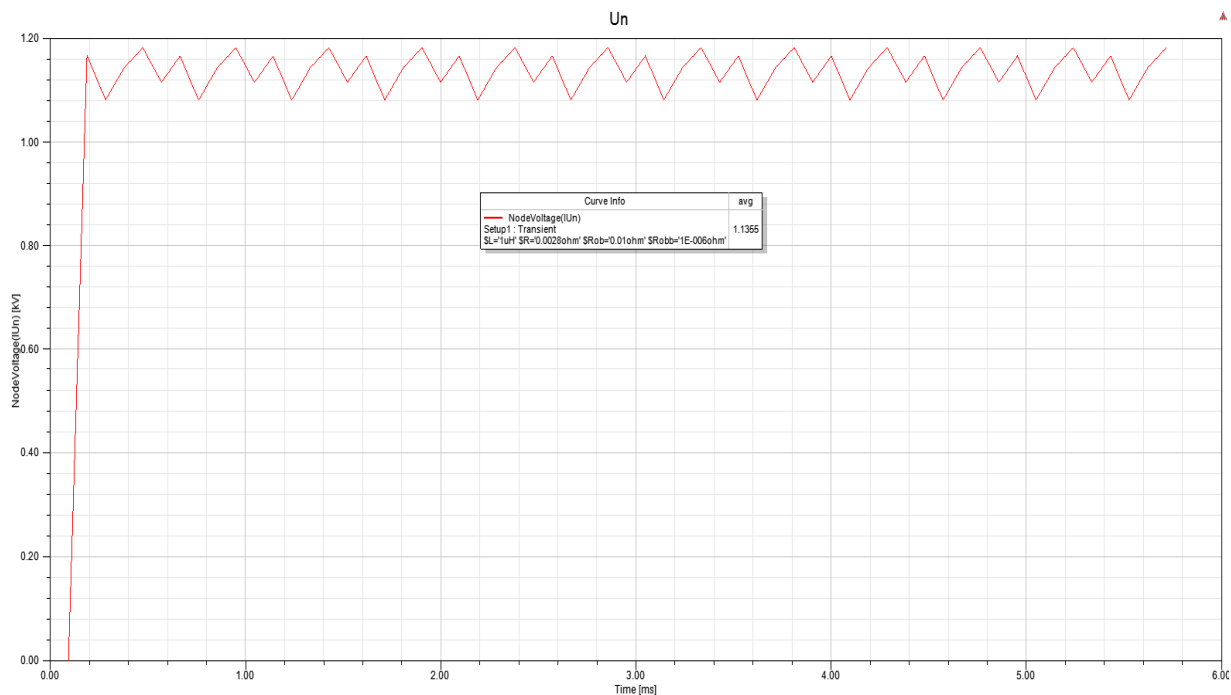


Рис. 3. Осциллограмма напряжения холостого хода при холодных магнитах

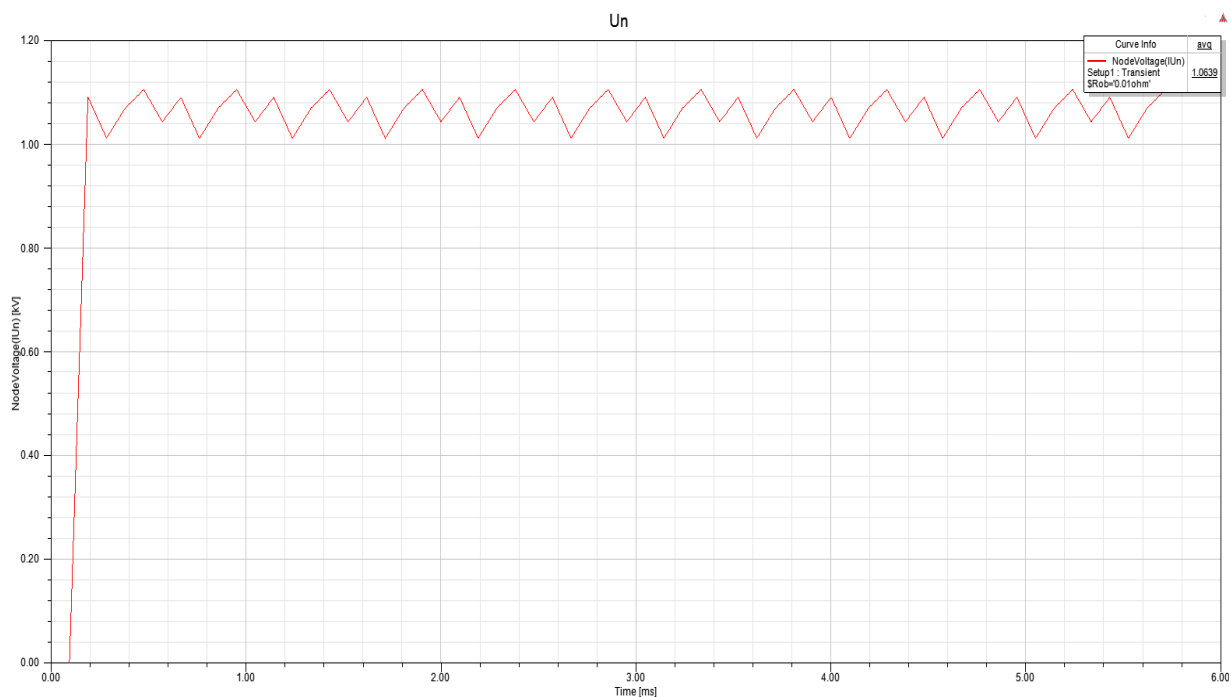


Рис. 4. Осциллограмма напряжения холостого хода при нагретых магнитах

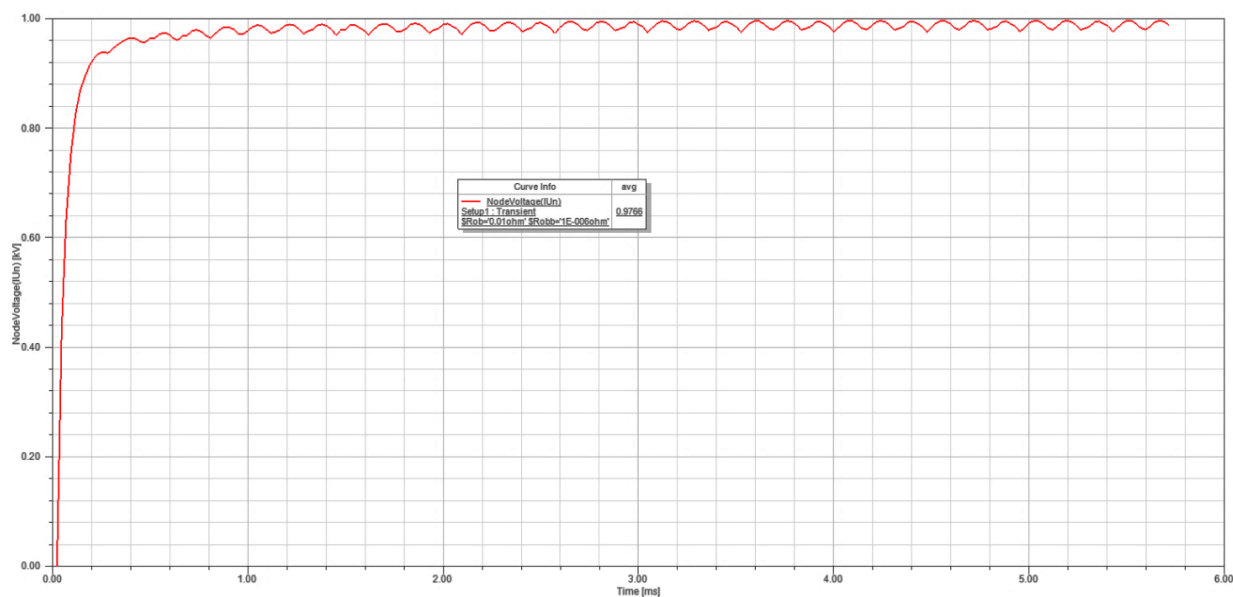


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на выходе выпрямителя под нагрузкой (полученное значение 980 В)

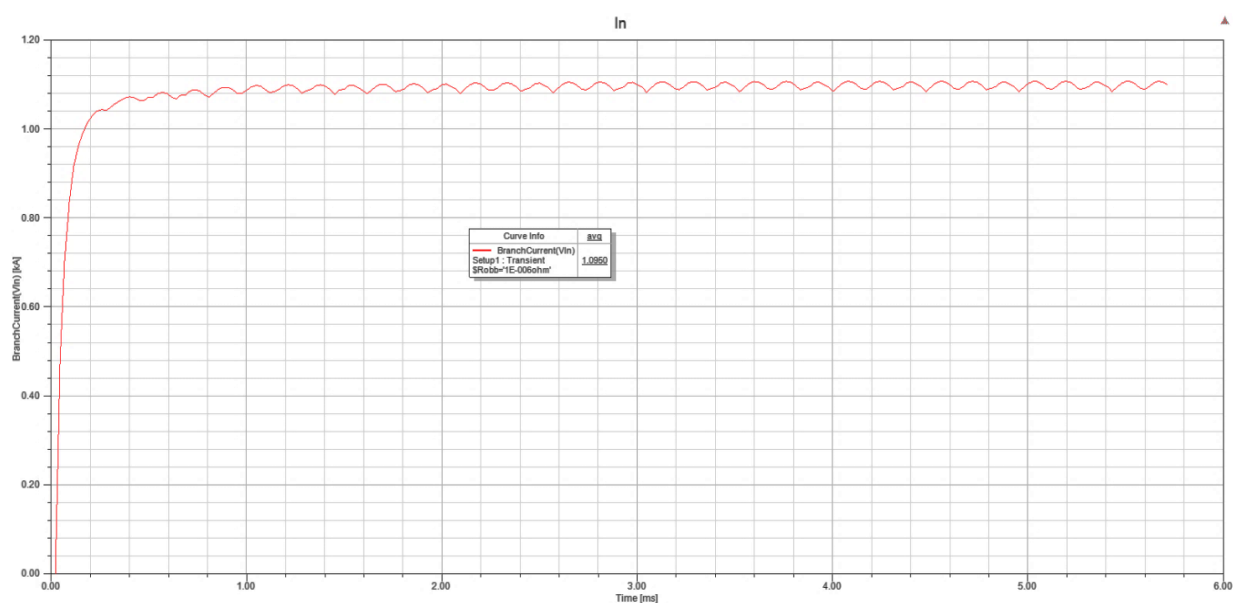


Рис. 6. Осциллограмма тока на выходе выпрямителя при номинальной нагрузке (полученное значение составляет 1100 А)

Также была проведена количественная оценка влияния эффекта вытеснения тока в пазу [15]. В паз генератора был заложен провод, представляющий из себя цельную медную шину. Под нагрузкой неизбежно возникает эффект вытеснения тока. Для стандартных асинхронных двигателей выбранные соотношения сторон провода и паза являются абсолютно приемлемыми, так как в стандартных асинхронных двигателях частота тока 50 Гц. В полученном генераторе частота тока в фазах составляет 350 Гц, вследствие чего эффект вытеснения тока в пазу усиливается, что приводит к резкому возрастанию потерь [16].

Количественная оценка влияния эффекта вытеснения тока по стандартным методикам

Вначале рекомендуется вычислить условную глубину проникновения тока в стержне, при этом принимается, что ток на данной глубине распределен равномерно.

Условная глубина проникновения тока:

$$h_r = \frac{a}{1 + \varphi},$$

где a – высота провода в пазу, мм;

φ – коэффициент, определяемый по эмпирическому графику в зависимости от безразмерного

коэффициента ξ , называемого «численной» высотой стержня.

Определим коэффициент:

$$\xi = 2\pi a \cdot 10^{-1} \sqrt{\frac{b}{b_n} \frac{f}{\rho}} \cdot 10^{-5} = 2\pi \cdot 0,01 \cdot 10^{-1} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{0,003}{0,0041} \frac{350}{0,01810^{-6}}} \cdot 10^{-5} = 2,37.$$

По эмпирическому графику определим коэффициент: $\varphi = 1,4$.

Отсюда определим условную глубину проникновения тока:

$$h_r = \frac{0,01}{1+1,4} = 4,167 \cdot 10^{-3}, \text{ м.}$$

Следующим шагом будет расчет сопротивления стержня с учетом вытеснения тока [17]. Известно, что от сопротивления потери в обмотке зависят прямо пропорционально:

$$P_{эл} = I^2 R. \quad (6)$$

Следовательно, коэффициент увеличения сопротивления вследствие вытеснения тока будет равен коэффициенту увеличения потерь по указанной причине. Коэффициент увеличения сопротивления стержня определяется по формуле:

$$K_r = 1 + \frac{l_{2п}}{l_2} \varphi, \quad (7)$$

где l_2 – длина стержня;

$l_{2п}$ – длина пазовой части стержня без длины в радиальных каналах.

Так как в исследуемом случае радиальные каналы отсутствуют, то описанные длины равны, а как следствие, их отношение равно 1.

Рассчитаем коэффициент увеличения сопротивления:

$$K_r = 1 + 1 \cdot 1,4 = 2,4.$$

Таким образом, согласно расчетам по эмпирическим формулам получено, что электрические потери вследствие вытеснения тока должны увеличиться в 2,4 раза. Точка максимального КПД должна сместиться в область значений ниже номинальной нагрузки, ориентировочно 650 кВт. Максимальный КПД изменится по значению и составит 95,5 % [18, 19].

Моделирование эффекта вытеснения тока в ПО ANSYS Maxwell

Далее был проведен расчет в ANSYS Maxwell с учетом вытеснения тока в пазу.

На рис. 7 изображена картина пазового рассеяния машины. Видно, что существенная часть потока замыкается по пути рассеяния и не сцепляется с основным потоком [20]. Эти потоки рассеяния наводят ЭДС, различную по высоте шины, что приводит к возникновению различных по высоте шины плотностей тока.

На рис. 8 показано распределение плотностей тока в пазу электрической машины вследствие эффекта вытеснения тока. Таким образом, получаем нерациональное использование меди в пазу, часть провода не работает, а другая часть сильно перегружена.

Далее была получена осциллограмма суммарных потерь в шинах обмотки, называемых в ПО ANSYS Maxwell «SolidLoss». Осциллограмма потерь представлена на рис. 9. На рисунке можно увидеть, что суммарные потери в меди составляют 45 кВт, как и было получено во время испытаний машины.

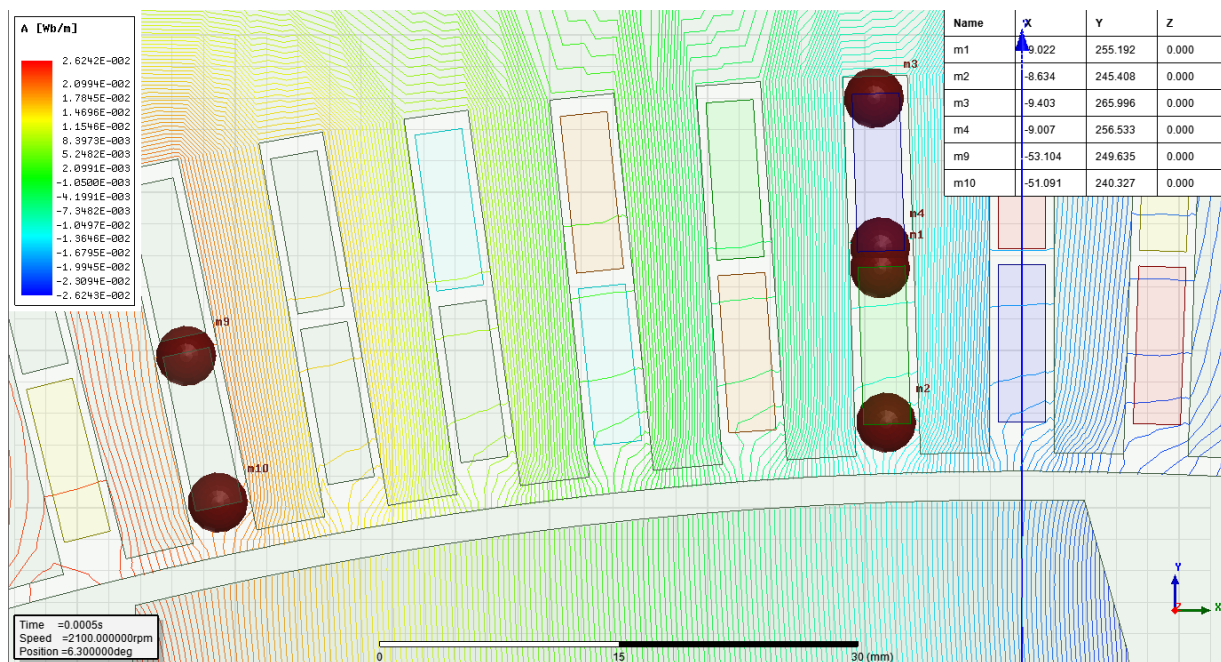


Рис. 7. Картина магнитного потока машины

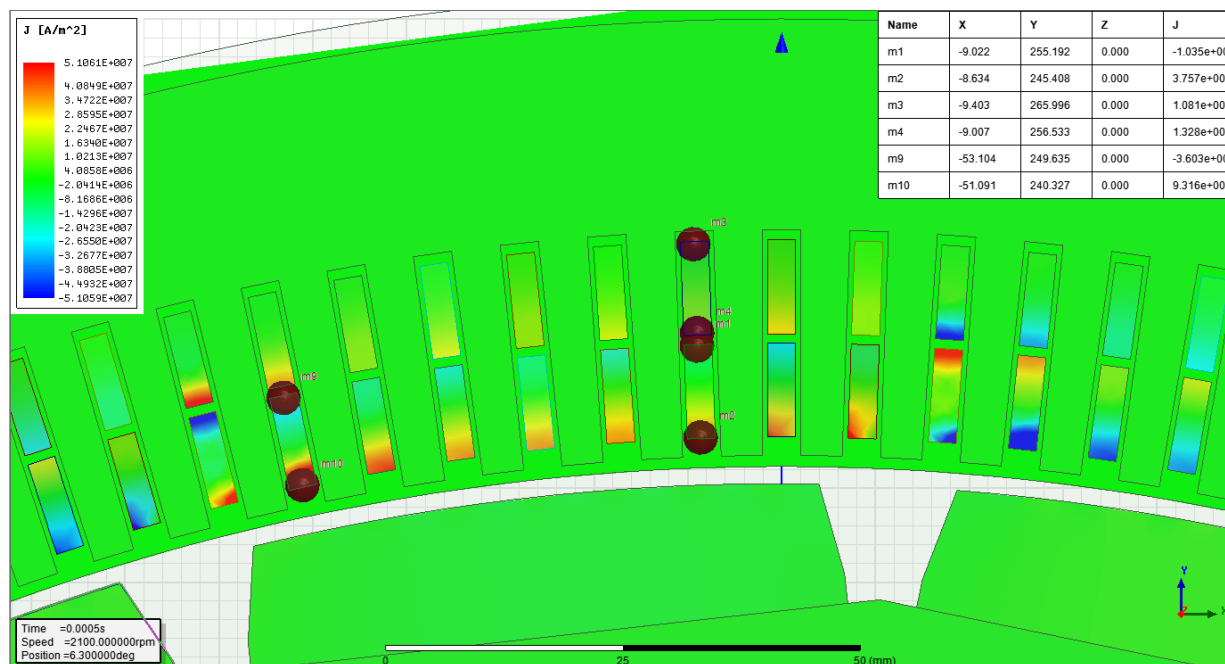


Рис. 8. Картина вытеснения тока в пазу

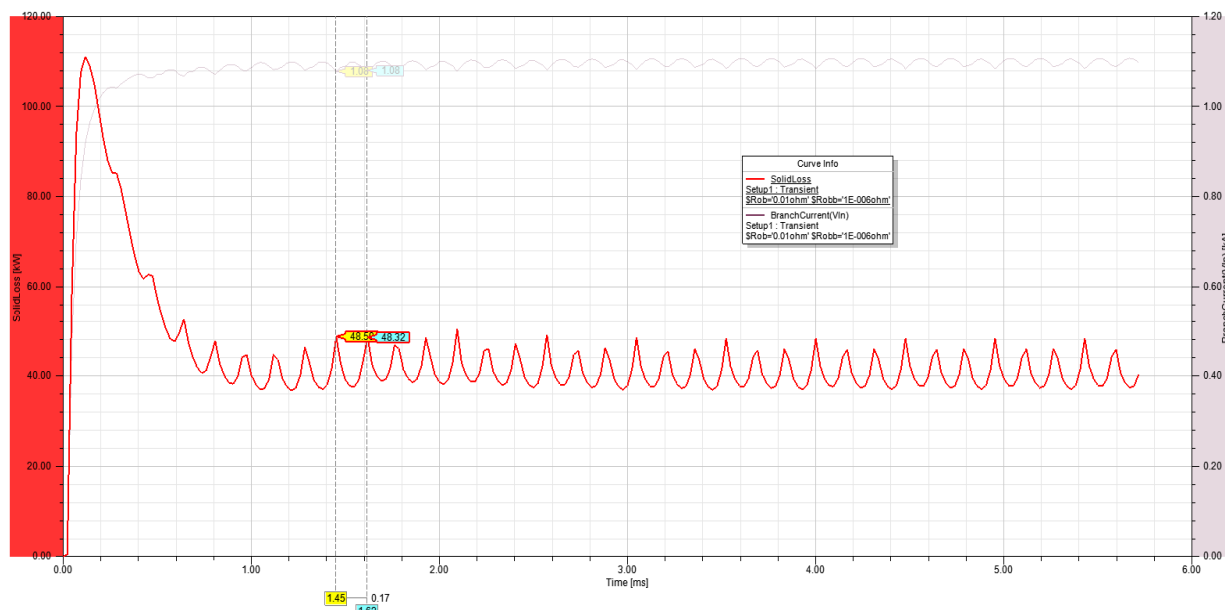


Рис. 9. Осциллограмма суммарных потерь в шинах обмотки генератора

Исходя из расчетов, проведенных в ANSYS Maxwell, следует вывод о том, что точка максимального КПД сместится в область более низких, относительного номинальной, нагрузок, ориентировочно 580 кВт. И величина максимального КПД в этом случае составит 95,1 %.

Заключение

На основании результатов проектирования генератора на АО «НПО «Электромашина» было изготовлено два макетных образца с использованием шин в пазах (с целью проведения научного экспе-

римента) и с использованием расщепленной обмотки. Макетные образцы были испытаны. Полученные результаты испытаний макетного образца с шинной обмоткой показали: магнитные потери (определяемые на холостом ходу) соответствуют расчетным, электрические потери в обмотке при номинальной нагрузке соответствуют значениям, полученным при расчете в ANSYS Maxwell, и, как следствие, превышают величину, полученную по стандартным методикам. Максимальный КПД находился в области 580 кВт, что дополнительно подтверждает верность расчетов в ПО ANSYS Maxwell.

Также были проведены испытания второго макетного образца с расщепленной обмоткой. По результатам испытаний было подтверждено исключение влияния эффекта вытеснения тока при использовании в пазу расщепленной обмотки. Максимальный КПД, согласно опытным данным, составил 97,4 % и был получен в номинальной точке.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение системы автоматического проектирования ANSYS Maxwell при расчетах количественного влияния эффекта вытеснения тока в обмотке машин переменного тока дает заведомо более точный результат, нежели ориентировочная оценка по стандартным методикам. Продемонстрирована легкость интерпретации всех результатов, получаемых при проектировании в ANSYS Maxwell, ввиду наглядности графического предоставления информации.

Также было показано, что электромагнитные расчеты в программном обеспечении ANSYS Maxwell аналогично подтверждаются при проведении испытаний изготовленных образцов в части всех характеристик, получаемых в процессе моделирования работы электромеханического преобразователя.

Литература

1. Вольдек, А.И. *Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учебн. заведений / А.И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.*
2. Копылов, И.П. *Проектирование электрических машин: учеб. / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.*
3. Сергеев, П.С. *Проектирование электрических машин / П.С. Сергеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.*
4. Мартыанов, А.С. *Анализ электромеханических систем с помощью Ansys Maxwell / А.С. Мартыанов, Н.И. Неустроев // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 19 (159). – С. 47–52.*
5. Татевосян, А.С. *Исследование индуктированной электродвижущей силы в обмотке магнетозлектрического генератора / А.С. Татевосян, А.А. Татевосян, В.В. Фокина // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф. молодых ученых. Ч. 1. Секция «Электротехника». – Новосибирск: НГТУ, 2015. – С. 67–71.*
6. Александров, Е.В. *Математическое описание асинхронного электродвигателя с учетом потерь в стали, поверхностного эффекта, насыщения магнитной системы основным потоком и потоками рассеяния / Е.В. Александров // Известия Тульского государственного университета. Серия «Технические науки». – 2010. – Вып. 2, ч. 2. – С. 243–250.*
7. Новожилов, М.А. *Разработка математической модели глубоководного асинхронного двигателя для исследования переходных процессов / М.А. Новожилов, В.А. Пионкевич // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 11. – С. 245–251.*
8. Sivokobylenko, V.F. *Design-experimental estimation of induction motors equivalent circuit parameters and characteristics / V.F. Sivokobylenko, S.V. Vasylets // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2014. – No. 5. – P. 76–82.*
9. Tatevosyan, A.A. *The study of the electromagnetic field of the synchronous magnetolectric generator / A.A. Tatevosyan, V.V. Fokina // International Siberian conference on control and communications. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2015. – P. 714–725. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147255*
10. Chalmers, B.J. *Developments in electrical machines using permanent magnets / B.J. Chalmers // Journal of magnetism and magnetic materials. – 1996. – Vol. 157–158. – P. 131–132. DOI: 10.1016/0304-8853(95)01038-6*
11. Vesa Ruuskanen. *Determining electrical efficiency of permanent magnet synchronous machines with different control methods / Vesa Ruuskanen, Paula Immonen, Janne Nerg, Juha Pyrhonen // Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 94, no. 2. – P. 97–106. DOI: 10.1007/s00202-011-0223-5*
12. Gandzha, S.A. *The comparative analysis of permanent magnet electric machines with integer and fractional number of slots per pole and phase / S.A. Gandzha, A.I. Sogrin, I.E. Kiessh // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 408–414. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.137*
13. Zapadnya, M.F. *Special-purpose high-velocity permanent magnet synchronous generator / M.F. Zapadnya, A.P. Shikhtin // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87, no. 11. – P. 647–650. DOI: 10.3103/S1068371216110134*
14. Трещев, И.И. *Электромеханические процессы в машинах переменного тока / И.И. Трещев. – Л.: Энергия, 1980. – 344 с.*
15. Zhang Yuejin. *3D magnetic field computation of a permanent magnet disc-type generator using scalar potential method / Zhang Yuejin, Xie Guodong, Tu Guanzhen // Journal of Shanghai University (English Edition). – 1997. – Vol. 1, no. 3. – P. 237–241. DOI: 10.1007/s11741-997-0030-4*
16. Bing Guo. *Calculation of rated load voltage for permanent magnet motor by finite element method / Bing Guo, XinZhen Wu // Unifying Electrical Engineering and Electronics Engineering. – 2013. – P. 757–765. DOI: 10.1007/978-1-4614-4981-2_82*
17. Schieber, D. *Electrodynamics of polyphase windings / D. Schieber // Electrical Engineering. – 1976. – Vol. 58, no. 2. – P. 117–127. DOI: 10.1007/BF01574197*
18. Hatzithanassiou, V. *Electrical-thermal cou-*

pled calculation of an asynchronous machine / V. Hatzithanassiou, J. Xypteras, G. Archontoulakis // Electrical Engineering. – 1994. – Vol. 77, no. 2. – P. 117–122. DOI: 10.1007/BF01578534

19. Scott D. Sudhoff. *Introduction to Permanent Magnet AC Machine Design / Scott D. Sudhoff //*

Wiley-IEEE Press. – 2014. – Vol. 1. – P. 488. DOI: 10.1002/9781118824603.ch09

20. Seung-Ki Sul. *Basic Structure and Modeling of Electric Machines and Power Converters / Seung-Ki Sul // Wiley-IEEE Press. – 2011. – Vol. 1. – P. 512. DOI: 10.1002/9780470876541.ch2*

Неустроев Николай Игоревич, ассистент, кафедра «Теоретические основы электротехники», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; neustroev.nikolai@mail.ru.

Котов Антон Андреевич, аспирант, кафедра «Теоретические основы электротехники», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; aakot@mail.ru.

Киесш Ирина Егоровна, старший преподаватель, кафедра «Теоретические основы электротехники», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kiesshie@susu.ru.

Поступила в редакцию 12 декабря 2017 г.

DOI: 10.14529/power180114

USING THE ANSYS MAXWELL CAD SYSTEM FOR QUANTITATIVE EVALUATION OF THE CURRENT DISPLACEMENT EFFECT IN AC MACHINES

N.I. Neustroev, neustroev.nikolai@mail.ru,

A.A. Kotov, aakot@mail.ru,

I.E. Kiessh, kiesshie@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

This paper dwells upon quantitative evaluation of the current displacement effect occurring in the buses located in AC machine bars, with evidence collected from a high-power magneto-electric generator. We herein specify the basic factors affecting the increase in currents observed in electric-machine buses. The paper presents examples of calculating the mean bus resistance increase by time-tested methods described in recognized scientific sources. We have also investigated the problem of modeling electromagnetic processes in ANSYS Maxwell, a CAD system. We make a specific emphasis on the functionality ANSYS Maxwell provides for graphical rendering of information derived from the simulation of electromechanical transducers. The presented graphical interpretation of generator simulation results makes it easier to understand the physics behind this phenomenon while also facilitating the use of the software. The two mentioned methods for quantitative current-displacement evaluation are herein further compared based on the experimental data AO NPO Elektromashina has obtained from the samples of a calculated high-power magneto-electric generator. Judging from this comparison of two methods for quantitative evaluation of current displacement in AC generator windings, we find the preferable method for calculating the total energy loss in the windings of electromechanical transducers. We also analyze the losses occurring in high-power magneto-electric generators, which losses affect considerably the efficiency of electric machines. We thus find the condition of maximizing the efficiency of high-power electric machines.

Keywords: electric machine, current displacement effect, computer-aided design system, ANSYS Maxwell, efficiency.

References

1. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya studentov vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy* [Electrical Machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1978. 832 p.

2. Kopylov I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnik* [Designing Electrical Machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 2005. 767 p.

3. Sergeev P.S. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Designing Electrical Machines]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 632 p.

4. Mart'yanov A.S., Neustroev N.I. [Analyzing Electromechanical Systems by Means of Ansys Maxwell]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology], 2014, no. 19 (159), pp. 47–52. (in Russ.)
5. Tatevosyan A.S., Tatevosyan A.A., Fokina V.V. [Investigating the Induced Electromotive Force in Magneto-Electric Generator Windings]. *Elektrotehnika. Elektrotehnologiya. Energetika: sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh* [Electrical Engineering. Electrotechnology. Energy: Collected Papers International Scientific Conference of Young Scientists]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2015, vol. 1, pp. 67–71. (in Russ.)
6. Aleksandrov, E.V. [Mathematical Description of an Asynchronous Electric Motor: Accounting for Losses in Steel, the Surface Effect, and the Saturation of the Magnetic System With Main and Stray Fluxes]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Tekhnicheskie nauki"* [News of Tula State University. Ser. Technical Sciences], 2010, vol. 2, no. 2, pp. 243–250. (in Russ.)
7. Novozhilov M.A., Pionkevich V.A. [Modeling a Deep Bar Asynchronous Motor to Study Transient Processes]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2014, no. 11, pp. 245–251. (in Russ.)
8. Sivokobylenko V.F., Vasylets S.V. Design-experimental Estimation of Induction Motors Equivalent Circuit Parameters and Characteristics. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2014, no. 5, pp. 76–82.
9. Tatevosyan A.A., Fokina V.V. The Study of the Electromagnetic Field of the Synchronous Magnetolectric Generator. *International Siberian Conference on Control and Communications. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 2015, pp. 714–725. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147255
10. Chalmers B.J. Developments in Electrical Machines Using Permanent Magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, vol. 157–158, pp. 131–132. DOI: 10.1016/0304-8853(95)01038-6
11. Vesa Ruuskanen, Paula Immonen, Janne Nerg, Juha Pyrhonen. Determining Electrical Efficiency of Permanent Magnet Synchronous Machines with Different Control Methods. *Electrical Engineering*, 2012, vol. 94, no. 2, pp. 97–106. DOI: 10.1007/s00202-011-0223-5
12. Gandzha S.A., Sogrin A.I., Kiessh I.E. The Comparative Analysis of Permanent Magnet Electric Machines with Integer and Fractional Number of Slots per Pole and Phase. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 408–414. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.137
13. Zapadnya M.F., Shikhtin A.P. Special-purpose High-velocity Permanent Magnet Synchronous Generator. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 11, pp. 647–650. DOI: 10.3103/S1068371216110134
14. Treshchev, I.I. *Elektromekhanicheskie protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Electromechanical Processes in Alternating-Current Machines], Leningrad, Energiya Publ., 1980. 344 p.
15. Zhang Yuejin, Xie Guodong, Tu Guanzhen. 3D Magnetic Field Computation of a Permanent Magnet Disc-Type Generator Using Scalar Potential Method. *Journal of Shanghai University (English Edition)*, 1997, vol. 1, no. 3, pp. 237–241. DOI: 10.1007/s11741-997-0030-4
16. Bing Guo, XinZhen Wu. Calculation of Rated Load Voltage for Permanent Magnet Motor by Finite Element Method. *Unifying Electrical Engineering and Electronics Engineering*, 2013, pp. 757–765. DOI: 10.1007/978-1-4614-4981-2_82
17. Schieber D. Electrodynamics of Polyphase Windings. *Electrical Engineering*, 1976, vol. 58, no. 2, pp. 117–127. DOI: 10.1007/BF01574197
18. Hatzianthassiou V., Xypteras J., Archontoulakis G. Electrical-thermal Coupled Calculation of an Asynchronous Machine]. *Electrical Engineering*, 1994, vol. 77, no. 2, pp. 117–122. DOI: 10.1007/BF01578534
19. Scott D. Sudhoff. Introduction to Permanent Magnet AC Machine Design. *Wiley-IEEE Press*, 2014, vol. 1, pp. 488. DOI: 10.1002/9781118824603.ch09
20. Seung-Ki Sul. Basic Structure and Modeling of Electric Machines and Power Converters. *Wiley-IEEE Press*, 2011, vol. 1, pp. 512. DOI: 10.1002/9780470876541.ch2

Received 12 December 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Неустроев, Н.И. Применение системы автоматического проектирования ANSYS Maxwell для количественной оценки влияния эффекта вытеснения тока в электрических машинах переменного тока / Н.И. Неустроев, А.А. Котов, И.Е. Киеш // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 112–121. DOI: 10.14529/power180114

FOR CITATION

Neustroev N.I., Kotov A.A., Kiessh I.E. Using the ANSYS Maxwell Cad system for Quantitative Evaluation of the Current Displacement Effect in AC Machines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 112–121. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180114