

УДК 621.314(075.8)

Д. И. Родькин, д-р техн. наук,
В. В. Ченчевой

ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ГЛУБОКОМ НАСЫЩЕНИИ СТАЛИ

Аннотация. Рассмотрены внешние характеристики асинхронного генератора при глубоком насыщении стали магнитопровода машины. Предложено выражение для определения аномальных потерь в стали асинхронной машины в режиме глубокого насыщения, которая позволяет с высокой точностью рассчитывать максимальную мощность, реализуемую генератором.

Ключевые слова: асинхронный генератор, внешние характеристики, потери в стали, глубокое насыщение, перегрузочная способность

D. Rod`kin, ScD.,
V. Chenchevoy

CHARACTERISTICS AND OPTIONS INDUCTION GENERATOR CASE OF DEEP SATURATION STEEL

Abstract. Considered the external characteristics of asynchronous generator with deep saturation magnetic steel machine. Proposed expression for the anomalous losses in the steel of the asynchronous machine in deep saturation mode, which allows you to accurately determine the maximum power sold by the generator.

Keywords: induction generator, external characteristics, iron loss, deep saturation, overload capacity

Д. Й. Родькін, д-р техн наук,
В. В. Ченчевой

ХАРАКТЕРИСТИКИ І РЕЖИМИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ГЛИБОКОМУ НАСИЧЕННІ СТАЛІ

Анотація. Розглянуті зовнішні характеристики асинхронного генератора при глибокому насиченні сталі магнітопроводу машини. Запропоновано вираз для визначення аномальних втрат у сталі асинхронної машини в режимі глибокого насичення, яка дозволяє з високою точністю розрахувати максимальну потужність, реалізовану генератором.

Ключові слова: асинхронний генератор, зовнішні характеристики, втрати в сталі, глибоке насичення, перевантажувальна здатність

Введение. Практическое использование регулируемых асинхронных машин и генераторов достаточно часто наталкивается на вопрос, касающийся их поведения при глубоком насыщении электротехнической стали. Этот режим соответствует тому состоянию, если рабочая точка на кривой намагничивания находится за коленом кривой, т.е. в области мало меняющихся ЭДС, но при значительных токах намагничивания [1, 2]. Работа в этой зоне характерна для асинхронных генераторов (АГ), работающих преимущественно в перевозбужденном состоянии, в системах релейного регулирования возбуждения, асинхронных двигателей при частотном управлении, когда требуется получение повышенных пусковых моментов или максимальной перегрузочной способности. Недостаточная изученность этого вопроса следует из анализа литературных источников [3, 4]. Так в [4] проф. Петров Л.П. показал, что при глубоком насыщении стали наблюдается аномальное увеличение потерь в стали, до величин несравненно больших, чем те, которые определяются квадратом частоты и напряжения [5]. Аналогичные результаты были получены как в отечественных, так и в зарубежных источниках (рис. 1). Это положение вытекает непосредствен

но из известной зависимости Штейнмеца [5], которая, как неоднократно указывалось, справедлива только для режима ненасыщенной и слабонасыщенной стали, т.е. до колена в кривой намагничивания, что соответствует номинальным режимом работы электрической машины [2]. Практические вопросы, связанные с затронутой проблемой и, прежде всего, создание работоспособных методик расчета параметров и характеристик АГ, работающих только за коленом кривой намагничивания, привели ряда авторов к необходимости уточнения формулы Штейнмеца с целью возможного применения ее, но без объяснения физических процессов, связанных именно с аномальным ростом потерь в стали [6 – 10]. Проблема усложнилась также из-за того, что кривая индукции при глубоком насыщении далека от того представления, на котором базируется формула Штейнмеца, и это потребовало усложнения расчетных зависимостей еще в большей степени за счет составляющих индукции разных частот [7 – 9]. Полученные при этом результаты имеют определенные затруднения в практическом применении, так как входящие в получаемые выражения коэффициенты зависят от марки стали и целого ряда других не менее значимых факторов.

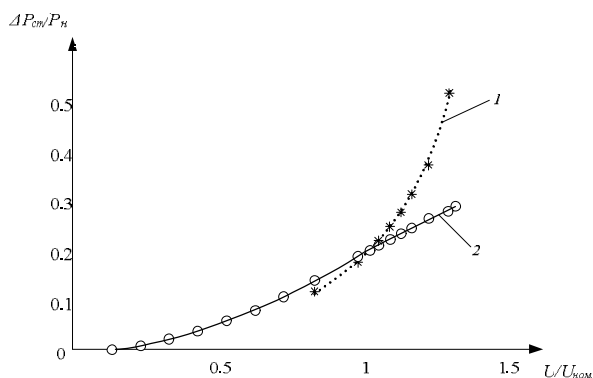


Рис. 1. Сравнение кривых потерь в стали:
 1 – экспериментальная кривая потерь;
 2 – кривая, полученная с помощью классических методов расчета потерь в стали

Постановка задачи исследования. Целью работы является установление закономерностей, позволяющие определить существенный рост потерь в стали асинхронной машины при ее глубоком насыщении и изменение в результате этого эксплуатационных характеристик машины.

Материалы исследования. Анализ литературных источников по определению потерь в стали, экспериментальных данных и, в частности, поведения петли гистерезиса ферромагнитных материалов и прежде всего электротехнической стали показывает, что значительный рост потерь при увеличении степени насыщения связан с поведением динамики доменных структур [11 – 12]. Здесь имеется в виду, прежде всего, рост запаздывания потока относительно тока намагничивания по мере увеличения частоты намагничивающего тока и его амплитуды. Это явление известно [12], однако оно при работе с малыми значениями индукции (до колена кривой намагничивания) не является определяющим. Результат в этом случае хорошо известен – потери в стали зависят от квадрата произведения индукции на частоту.

На магнитное запаздывание указывают результаты, полученные ведущими учеными, чьи труды, посвященные изучению материалов при периодическом перемагничивании, носят, несомненно, фундаментальный характер. Результаты исследований указывают на процесс тепловыделения в стали, тесно связанным с поведением элементарных полеобразующих компонент – доменов [13 – 14].

Запаздывание процесса формирования поля по отношению к вынуждающему фактору – намагничивающей силе, проявляется в следующем:

- амплитуда намагничивающего тока непосредственно связана с процессом запаздывания изменения поля. При этом увеличение тока намагничивания приводит к большему проявлению этого процесса;
- наличие нелинейных искажений в кривой тока намагничивания приводит к росту времени запаздывания соответствующих компонент потока на величину, кратную запаздыванию на первой гармонике.

Анализ источников, лабораторные исследования, теоретический анализ позволил создать математиче-

скую модель потерь в стали при периодическом перемагничивании и глубоком насыщении. Результаты моделирования подтверждают теоретический вывод, касающийся аномальных потерь в упомянутых режимах [15].

В ходе исследований процессов перемагничивания с использованием классических подходов к этому вопросу [16], установлена зависимость, связывающая характеристики материала и динамику движения доменных структур,

$$P_{\omega} = \frac{2\pi\lambda\mu_0\gamma a^2 \left(\frac{3k\Delta T}{4\pi} / (dB/dH) \right)^b}{v^2 A}, \quad (1)$$

где γ – энергия доменных структур, приходящаяся на единицу площади; v – гиромангнитное соотношение; A – константа неоднородного обменного взаимодействия; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; λ – константа спин-орбитального взаимодействия, k – постоянная Больцмана; $\Delta T = \Theta - T$, T – температура магнетика; Θ – точка Кюри, H и B – напряженность и индукция магнитного поля, a и b – коэффициенты аппроксимации.

Упрощение некоторых составляющих зависимости (1), позволило получить выражение для определения потерь в стали, пригодное для практического использования как в исследовательской, так и в инженерной практике [15]:

$$\Delta P_c(I) = \frac{\xi}{\left(\frac{dE(I)}{dI} \right)^2} (E(I))^2, \quad (2)$$

где ξ – коэффициент, зависящий от характеристик стали, $E(I)$ – зависимость ЭДС от тока намагничивания асинхронной машины; I – ток намагничивания.

Зависимость (2) может быть использована для анализа процессов при работе в зоне нормального намагничивания, так и в зоне глубокого насыщения. Факторами, определяющими работоспособность зависимости, является поведение кривой намагничивания и прежде всего значение ЭДС и ее производной.

В зоне до колена в кривой значение ЭДС $E(I)$, которая пропорциональна току (при работе в зоне нормального намагничивания), имеет постоянное значение,

т.е. $\frac{1}{\left(\frac{dE(I)}{dI} \right)^2} = const = c$. В этом случае потери будут:

$$\Delta P_c(I) = \xi \cdot \tilde{n} \cdot (E(I))^2. \quad (3)$$

В зоне глубокого насыщения значение $E(I)$ примерно постоянное, а $\left(\frac{dE(I)}{dI} \right) = var$. Тогда выражение для потерь в стали примет вид (2).

Для подтверждения полученных результатов на рис. 2 показано отображение экспериментальной кривой потерь в стали для двигателя АО2–31–2, полученная проф. Петровым Л.П. и кривой, полученной с помощью выражения (2). Как видно, предложенный

способ определения потерь в стали позволяет с высокой точностью описывать потери, возникающие в режиме глубокого насыщения в АГ. Совпадение экспериментальной кривой с кривой, полученной на основании предложенного математического выражения, позволяет считать, что данный способ является приемлемым и его можно использовать при анализе энергетических режимов, где уточненный учет потерь необходим [4].

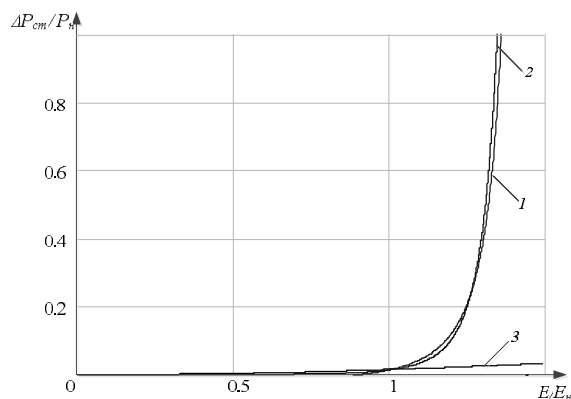


Рис. 2. Сравнение кривых потерь стали асинхронного двигателя:

1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая по выражению (2); 3 – кривая, полученная с применением классических методов

Учет потерь в стали важен при создании генераторных установок на базе асинхронной машины, в частности, при расчете максимальной мощности, реализуемой генератором. При анализе крупных машин допущение об отсутствии потерь в стали не оказывает существенного влияния на точность расчета [3]. По мере снижения мощности, относительные значения активной составляющей тока холостого хода и потерь в стали возрастают, что сказывается на точности расчета характеристик АГ. Поэтому пренебрежение потерями в стали приводит к заметным ошибкам при расчете характеристик АГ и часто является недопустимым. Между тем известные методы расчета режимов асинхронной машины с конденсаторным возбуждением обычно ограничиваются косвенным учетом потерь в стали машины [17 – 19].

Расчет внешних характеристик выполнен согласно методу, предложенному в [20]. Потери в асинхронном двигателе определяются по общепринятым в теории электрических машин выражениям [21].

При этом магнитные потери, вызываемые гистерезисом и вихревыми токами в сердечнике статора, определялись традиционным методом

$$(\Delta P_c = \Delta P_{c.n} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1H}}\right)^2), \text{ где } \Delta P_{c.n} \text{ – потери активной}$$

мощности в стали при номинальном напряжении, Вт; U_{1H} – номинальное фазное напряжение, В; и с использованием полученного выражения для определения аномальных потерь в стали в режиме глубокого насыщения (2).

С целью проверки правильности предлагаемого метода была использована экспериментальная кривая намагничивания для двигателя АО2–31–2 [4].

Для принятия решения об использовании асинхронного двигателя в генераторном режиме необходимо знать, какую максимальную мощность нагрузки можно подключить к такому генератору.

При построении характеристик использовался асинхронный двигатель с фазным ротором АОЛ2-31-4 с паспортными данными: $P_{НОМ} = 2,2 \text{ кВт}$; $p = 2$; $I_{НОМ} = 4,9 \text{ А}$; $n_{НОМ} = 1430 \text{ об/мин}$; $\cos \phi_{НОМ} = 0,825$; $\eta_{НОМ} = 81\%$ и параметрами схемы замещения $R_1 = 2,5 \text{ Ом}$; $R_2 = 1,8 \text{ Ом}$; $x_1 = 2,5 \text{ Ом}$; $x_2 = 2,85 \text{ Ом}$; $x_\mu = 115 \text{ Ом}$; $\xi = 0,004$.

Внешние характеристики АГ, полученные с использованием различных выражений для определения потерь в стали и при изменении величины емкости конденсаторов возбуждения, приведены на рис. 3. Для сравнения характеристики представлены в относительных единицах. Мощность на нагрузке выражена в долях номинальной мощности асинхронной машины.

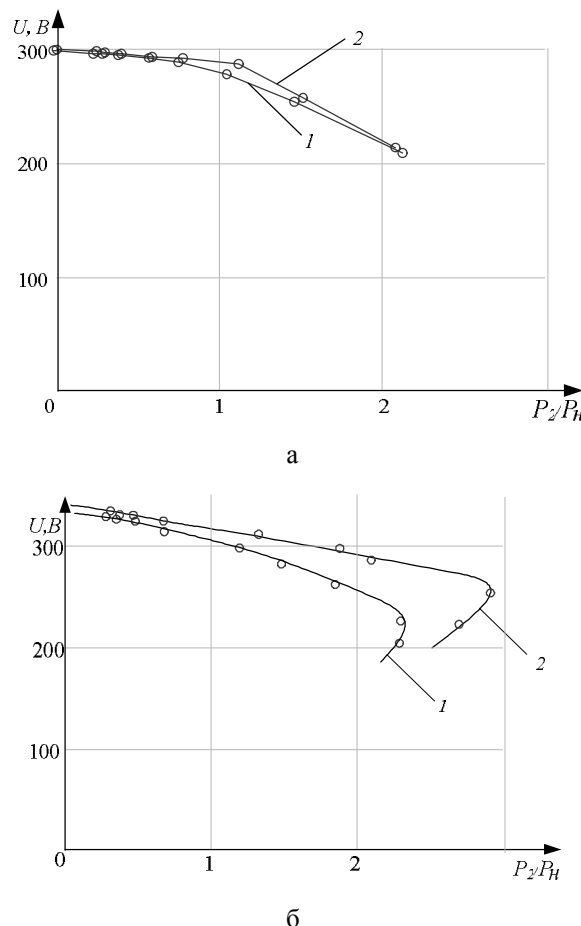


Рис. 3. Нагрузочные характеристики АГ при различных значениях емкости конденсаторов возбуждения: а – 200 мкФ, б – 500 мкФ:

1 – по выражению (2);
 2 – с помощью классических методов

Полученные зависимости позволяют определить максимальную мощность нагрузки по величине емкостей возбуждения, и наоборот, необходимые начальные входные параметры АГ, если известна мощность нагрузки. Таким образом, установленные зависимости позволяют по одному из начальных параметров АГ определять остальные, не прибегая к сложным вычислениям.

Можно выделить в работе АГ два различных режима:

- продолжительный – характеризуется максимальным значением КПД;
- кратковременный – характеризуется тем, что на выходе АГ генерируется максимальная мощность.

Из рассмотрения представленных кривых (рис. 4) видно, что применение больших емкостей приводит к увеличению нагрузочной способности, но и к высокому насыщению магнитной системы генератора, увеличению потерь и к понижению КПД. Этим обеспечивается сравнительно пологая форма характеристик и значительная перегрузочная способность машины.

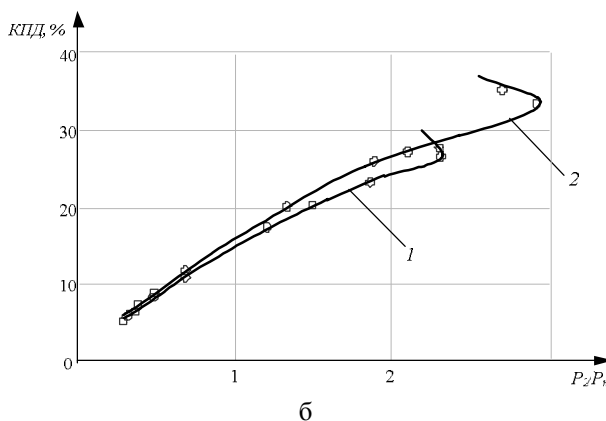
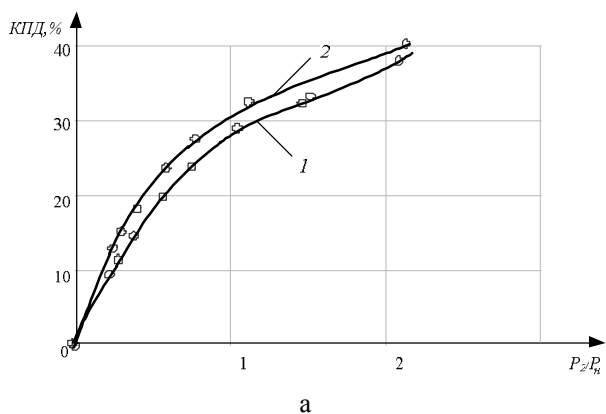


Рис. 4. Зависимость КПД генератора от величины генерируемой мощности при различных значениях емкости конденсаторов возбуждения: а – 200 мкФ, б – 500 мкФ: 1 – по выражению (2); 2 – с помощью классических методов

Дальнейшее увеличение емкости не дает возможности снять с генератора максимальную мощность, но приводит к быстро спадающим кривым. Следовательно, достижением максимальной перегрузочной способности возможно управление энергетическими процессами в генераторе.

Выводы

1. Обосновано аналитическое выражение для определения потерь в стали асинхронной машины на основании динамики доменных структур, которое позволяет получить высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных, и может быть использовано при разработке систем асинхронного электропривода, работающего в режиме глубокого насыщения.

2. Теоретические результаты позволяют анализировать влияние потерь в стали на характеристики АГ при различных режимах работы.

3. Исследования показали, что применение предложенного выражения для определения потерь в стали в режиме глубокого насыщения приводит к снижению перегрузочной способности АГ на 10 – 20 % по сравнению с известными методами.

Список использованной литературы

1. Копылов И. П. *Электромеханические преобразователи энергии* / И. П. Копылов – М. : Энергия. – 1973. – 400 с.
2. Иванов-Смоленский А. В. *Электрические машины* / А. В. Иванов-Смоленский – М. : Энергия. – 1980. – 927 с.
3. Джэндубаев А-З. Р. Математическое моделирование асинхронного генератора с учетом потерь в стали [Текст] / А-З. Р. Джэндубаев // *Электричество*. – 2003. – № 7. – С. 36 – 45.
4. Петров Л. П. *Управление пуском и торможением асинхронных двигателей* / Л. П. Петров – М. : Энергоатомиздат. – 1981. – 183 с.
5. Steinmetz C., (1984), On the Law of Hysteresis, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 72, No. 2, pp. 197 – 221.
6. Amar M., and Protat F., (1994), A Simple Method for the Estimation of Power Losses in Silicon iron Sheets under Alternating Pulse Voltage Excitation, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 30, pp. 842 – 944.
7. Cheng Y., and Pillay P., (2002), An Improved Formula for Lamination core loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux Density Excitation *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 13 – 18 October 2002*, Vol. 2, pp. 759 – 766.
8. Herranz Gracia M., Langeand E., and Hameyer K., (2007), Calculation of Iron Losses in Electrical Machines with a Modified Post-Processing Formula. *Proc. of 16th COMPUMAG*, pp. 363 – 365.
9. Lotten T., Pillay M.P. and Singampalli N.A., (2003), Lamination core Loss Measurements in Machines Operating with PWM or Non-Sinusoidal Excitation, *Proc. Electr. Machines Drives Conf., 1 – 4 June 2003*, Vol. 2, pp. 743 – 746.
10. Ruifang L., Chris M., and Wenzhong G., (2008), Modeling of Eddy Current Losses of Electrical Machines and Transformers Operated by Pulsewidth-Modulated Inverters, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 8.
11. Успенская Л. С. Ассиметричная кинетика перемещения тонких обменносвязанных пленок ферромагнетика [Текст] / Л. С. Успенская // *Физика твердого тела*. – 2010. – Т. 52. – Вып. 11. – С. 2131 – 2137.

12. Тиунов В. Ф. Динамическое поведение доменной структуры монокристаллов Fe-3% Si при высоких значениях максимальной индукции и электромагнитные потери [Текст] / В. Ф. Тиунов, В. А. Зайкова, Я. С. Шур // *Физика металлов и металловедение*. – М. : Наука. – 1980. – Т. 49. – Вып. 4. – С. 766 – 775.

13. Кандаурова Г. С. Влияние параметров гармонического магнитного поля на динамические петли гистерезиса и доменную структуру пленки феррита-граната [Текст] / Г. С. Кандаурова, А. Г. Пашко, В. Х. Осадченко // *Физика твердого тела*. – 2009. – Т. 51. – Вып. 5. – С. 911 – 915.

14. Волков В. В. Динамика доменной стенки в ферромагнетиках [Текст] / В. В. Волков, В. А. Боков // *Физика твердого тела*. – 2008. – Т. 50. – Вып. 2. – С. 193 – 221.

15. Родькин Д. И. Природа аномального роста потерь в электротехнической стали в режиме глубокого насыщения [Текст] / Д. И. Родькин, В. А. Огарь, В. В. Ченчевой // *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 10–11 квітня 2014*. – Кременчук : КрНУ. – 2014. – С. 76 – 93.

16. Al-Bahrani A.H., and Malik N.H., (1990), Steady-State Analysis and Performance Characteristic of a 3-phase Induction Generator Self-Excited with a Single Capacitor, *IEEE Trans. Energy Convers*, Vol. 5, No. 4, pp. 725 – 732.

17. Murthy S.S., Malik O.P., and Tandon A.K. (1982), Analysis of self Excited Induction Generator, *Proc. Inst. Elect. Eng. C*, Vol. 129, No. 6, pp. 260 – 265.

18. Narayanan S.Y., and Johnny V.J., (1986), Contribution to the Steady State Analysis of Wind-Turbine Driver Self-Excited Induction Generator, *IEEE Trans. Energy Convers*, Vol. EC-1, No. 1, pp. 169 – 176.

19. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практическое применение / С. Тикадзуми – М. : Мир. – 1987. – 420 с.

20. Кашкалов В. И. Торможение асинхронных двигателей без внешнего источника энергии / В. И. Кашкалов, Ф. Ф. Долгополов – К : Техника. – 1985. – 117 с.

21. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов – М. : Высшая школа. – 2001. – 327 с.

3. Dzhendubaev A-Z. R. Matematicheskoe modelirovanie asinkhronnogo generatora s uchetom poter v stali [Mathematical Modeling of Asynchronous Generator Taking into Account Losses in the Steel], (2003), *Elektrichestvo Publ.*, Vol. 7, pp. 36 – 45 (In Russian).

4. Petrov L.P. Upravlenie puskom i tormozhenie asinkhronnykh elektrodvigateley [Management Start and Braking of Asynchronous Motors], (1981), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat Publ.*, 183 p. (In Russian).

5. Steinmetz C., (1984), On the Law of Hysteresis, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 72, No. 2, pp. 197 – 221.

6. Amar M., and Protat F., (1994), A Simple Method for the Estimation of Power Losses in Silicon iron Sheets under Alternating Pulse Voltage Excitation, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 30, pp. 842 – 944.

7. Cheng Y., and Pillay P., (2002), An Improved Formula for Lamination core loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux Density Excitation *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 13 – 18 October 2002*, Vol. 2, pp. 759 – 766.

8. Herranz Gracia M., Langeand E., and Hameyer K., (2007), Calculation of Iron Losses in Electrical Machines with a Modified Post-Processing Formula. *Proc. of 16th COMPUMAG*, pp. 363 – 365.

9. Lotten T., Pillay M.P. and Singampalli N.A. (2003), Lamination core Loss Measurements in Machines Operating with PWM or Non-Sinusoidal Excitation, *Proc. Electr. Machines Drives Conf., 1–4 June 2003*, Vol. 2, pp. 743 – 746.

10. Ruifang L., Chris M., and Wenzhong G., (2008), Modeling of Eddy Current Losses of Electrical Machines and Transformers Operated by Pulsewidth-Modulated Inverters, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 8.

11. Uspenskaya L.S. Assimetricheskaya kinetika peremagnichivaniya tonkikh obmennosvyaznykh plenok feromagnetika [Asymmetric Kinetics of Magnetization Reversal thin Exchange-Coupled Ferromagnetic Films], (2010), *Fizika Tverdogo Tela Publ.*, Vol. 52, pp. 2131 – 2137 (In Russian).

12. Tiunov V.F., Zaykova V.A., and Shchur Y.S. Dinamicheskoe povedenie domennoy struktury monokristallov Fe-3% Si pri vysokikh znacheniyakh maksimalnoy induktsii i elektromagnitnye poteri [The Dynamic Behavior of the Domain Structure of Single Crystals of Fe-3% Si at High Maximum Induction and Electromagnetic Losses], (1980), *Fizika Metallov i Metallovedenie Publ.*, Moscow, Russian Federation, Vol. 49, pp. 766 – 775 (In Russian).

13. Kandaurova G.S., Pashko A.G., and Osadchenko V.H. Vliyanie parametrov garmonicheskogo magnitnogo polya na dinamicheskie petli gisterezisa i domennuyu strukturu plenki ferrita-granata [Influence of Parameters of a Harmonic Magnetic Field on the Dynamic of the Hysteresis Loop and the Domain Structure of the Film Ferrite-Garnet], (2009), *Fizika Tverdogo Tela Publ.*, Vol. 51, pp. 911 – 915 (In Russian).

14. Volkov V.V., and Bokov V.A. Dinamika domennoy stenki v ferromagnetikakh [Dynamics of Domain walls in Ferromagnets], (2008), *Fizika Tverdogo Tela Publ.*, Vol. 50, pp. 193 – 221 (In Russian).

Получено 12.07.2014

References

1. Kopylov I.P. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii* [Electromechanical Energy Converters], (1973), Moscow, Russian Federation, *Energiya Publ.*, 400 p. (In Russian).

2. Ivanov-Smolenskiy A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electric Machines], (1980), Moscow, Russian Federation, *Energiya Publ.*, 927 p. (In Russian).

15. Rodkin D.I., Ogar V.A., and Chenchevoy V.V. Priroda anomalnogo rosta poter v stali v elektrotekhnicheskoy stali v rezhime glubokogo насыщения [Nature Abnormal Growth of Losses in Electrical Steel in Deep Saturation mode], (2014), *Elektromekhanichni ta Energetychni Systemy, Metody Modelyuvannya ta Optimizatsii. Zbirnik Naukovykh Prats XII Mizhnarodnoi Naukovo-tekhnichnoi Konferentsii Molodykh Uchenykh I Spetsialistiv Publ.*, Kremenchug, Ukraine, pp. 76 – 93 (In Russian).

16. Tikadzumi S. *Fizika feromagnetizma* [Physics of Ferromagnetism], (1987), Moscow, Russian Federation, *Mir Publ.*, 420 p. (In Russian).

17. Al-Bahrani A.H., and Malik N.H., (1990), Steady-state Analysis and Performance Characteristic of a 3-phase Induction Generator Self-Excited with a Single Capacitor, *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 5, No. 4, pp. 725 – 732.

18. Murthy S.S., Malik O.P., and Tandon A.K. (1982), Analysis of Self Excited Induction Generator, *Proc. Inst. Elect. Eng. C*, Vol. 129, No. 6, pp. 260 – 265.

19. Narayanan S.Y., and Johnny V.J., (1986), Contribution to the Steady State Analysis of Wind-Turbine Driver Self-Excited Induction Generator, *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. EC-1, No. 1, pp. 169 – 176.

20. Kashkalov V.I., and Dolgoplov F.F. Tormozhenie asinkhronnykh dvigateley bez vneshnego istochnika energii [Inhibition of Asynchronous Motors without an External Energy Source], (1985), Kiev, Ukraine, *Tekhnika Publ.*, 117 p. (In Russian).

21. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashyn* [Mathematical Modeling of Electrical Machines], (2001), Moscow, Russian Federation, *Vysshya shkola Publ.*, 327 p. (In Russian).



Родькин
Дмитрий Иосифович,
д-р техн. наук, проф.,
зав. каф. систем автоматического
управления и электропривода
Кременчугского нац. ун-та имени
Михаила Остроградского.
39600, Кременчуг,
ул. Первомайская, 20.
E-mail: saue@kdu.edu.ua



Ченчевой
Владимир Витальевич,
ассистент каф. систем автоматического
управления и электропривода
Кременчугского нац. ун-та имени
Михаила Остроградского.
39600, Кременчуг,
ул. Первомайская, 20.
E-mail:
vladchen.86@gmail.com