

УДК 621.313.333.2

## К ОСОБЕННОСТЯМ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПОТЕРЬ В СТАЛИ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

В. С. Петрушин, В. П. Чайковский, Р. Н. Еноктаев  
Одесский национальный политехнический университет

**Аннотация.** Предлагается методика расчета основных потерь в стали асинхронных двигателей, в которой при разделении удельных потерь на две составляющие (гистерезисную и вихревую) вводится коэффициент, учитывающий расширение петли гистерезиса. Получены аналитические выражения для расчета основных потерь в стали, что позволяет уточнить их значения в асинхронных двигателях, в том числе и в регулируемых.

**Ключевые слова:** потери в стали, потери на вихревые токи, потери на гистерезис, коэффициент расширения петли гистерезиса, математическая модель, регулируемый асинхронный двигатель.

### Введение

Основным энергетическим параметром электромеханической системы (ЭМС) является величина потерь энергии. В ЭМС с регулируемыми асинхронными двигателями присутствуют потери энергии в преобразователе частоты, электрической машине и механической передаче [1]. Значение потерь двигателей существенно зависит от нагрузки, при этом величина электрических потерь определяется значениями токов, протекающих по обмоткам, а потери в стали для двигателей общепромышленного исполнения традиционной конструкции могут составлять более 20 % полных потерь номинального режима и более 50 % полных потерь холостого хода [2, 3]. При питании двигателей от полупроводниковых преобразователей дополнительно увеличиваются магнитные потери на 5–10 % [4–7] и уточнение расчета потерь в стали регулируемых асинхронных двигателей является актуальной задачей [8].

Уровень основных потерь в стали прежде всего зависит от марки и толщины используемой электротехнической стали (ЭТС) и от величины индукции. Каждому значению индукции соответствует определенное значение удельных потерь в стали  $p_{\gamma\delta}$ . Удельные потери в стали можно разделить на две составляющие – гистерезисную  $p_{гс}$  и вихревую  $p_{вх}$ . За счет этого разделения определяются потери в стали при частотах, отличных от базовых, а также при несинусоидальном напряжении.

Используется ряд методик расчета удельных потерь в стали. Основные расчетные зависимос-

ти наиболее часто применяющихся методик предложены:

Дружининым В. В. [9]

$$p_{вх} = p_{гс} + p_{вх} = k_1 f B^n + k_2 f^2 B^2 a^2, \quad (1)$$

где  $k_1, k_2$  – коэффициенты, зависящие от свойств стали;  $f$  – частота приложенного напряжения;  $a$  – толщина листа стали;  $n$  – показатель степени, который для современных сталей (в зависимости от марки) составляет 2...2,5;

Петровым Г. Н. [10]

$$p_{гс} = \alpha f B + \beta f B = \sigma_h f B^2, \quad (2)$$

где  $\alpha, \beta$  – коэффициенты, определяемые опытным путем и зависящие от свойств материала;  $\sigma_h$  – постоянная, зависящая от свойств материала

$$p_{вх} = \frac{4}{3\rho} (a \cdot f \cdot f_E \cdot B)^2 = \sigma_f f^2 B^2, \quad (3)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление ЭТС;  $a$  – толщина листа;  $f_E$  – коэффициент формы кривой электродвижущей силы (ЭДС);  $\sigma_f$  – постоянная, зависящая от свойств материала.

Проанализировав представленные расчетные зависимости, можно сделать следующие выводы:

– расчетные зависимости основываются на эмпирических данных и коэффициентах ( $n, \sigma_h, \sigma_f$ ), которые должны быть определены экспериментально для конкретной марки и толщины ЭТС.

– применение эмпирических коэффициентов не способствует достаточно точному определению

© Петрушин В. С., Чайковский В. П.,  
Еноктаев Р. Н., 2017

нию потерь в стали при различных частотах, а также при несинусоидальном напряжении.

### 1. Постановка задач исследования

На этапе проектирования АД можно воспользоваться методикой определения потерь в стали [5] с использованием справочных данных электрической машины [11]. Согласно этой методике основные потери в стали определяются как

$$P_{ст,общ} = p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot (k_{Да} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{Дз} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}), \quad (4)$$

где  $p_{1,0/50}$  – общие удельные потери при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц, Вт/кг;  $\beta$  – показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания ( $\beta=1,3 \div 1,5$ );  $k_{Да}$ ,  $k_{Дз}$  – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов;  $B_a$ ,  $B_{z1}$  – индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора, Тл;  $m_a$ ,  $m_{z1}$  – масса стали ярма и зубцов статора, кг;  $f$  – частота перемагничивания, Гц.

Индукция в ярме и индукция в зубцах зависят от величины магнитного потока, который пропорционален ЭДС взаимной индукции и обратно пропорционален частоте. Следовательно, величина основных потерь в стали зависит только от двух переменных: ЭДС взаимной индукции и частоты перемагничивания.

Целесообразно использование разделения удельных потерь на две составляющие – вихревую и гистерезисную с введением коэффициента расширения петли гистерезиса  $k_p$ .

### 2. Материалы и результаты исследований

Предлагаемый коэффициент  $k_p$  меняется при изменении частоты переменного тока. Определение коэффициента основывалось на обработке экспериментальных данных, в частности, стали марки М5Т23 производства FEMAG (Италия) [12]. На рис. 1 представлены семейства петель гистерезиса для различных частот перемагничивания. Аналогичное расширение петель гистерезиса наблюдается и в других марках ЭТС.

Для измерения магнитных характеристик при частотах 100, 400, 600 Гц был использован тип измерительной системы DEM 25 (Brockhaus Messtechnik-Germany). Метод измерения соот-

ветствует IEC 60404-2 международному стандарту, применимому к изотропным и анизотропным электротехническим сталям, при измерении частот до 1,5 кГц с использованием аппарата Эпштейна [12].

Исходя из рис. 1 возможно представить зависимость изменения коэффициента расширения петли гистерезиса от частоты переменного тока для стали марки М5Т23, которая

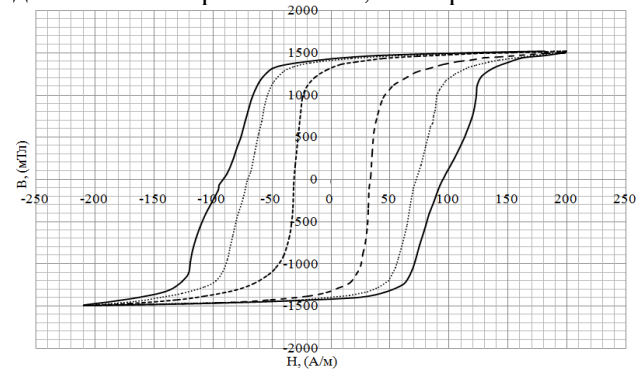


Рис. 1. Семейство петель гистерезиса для листа ЭТС марки М5Т23 толщиной 0,23мм: — 100 Гц, ···· 400 Гц; — 600 Гц

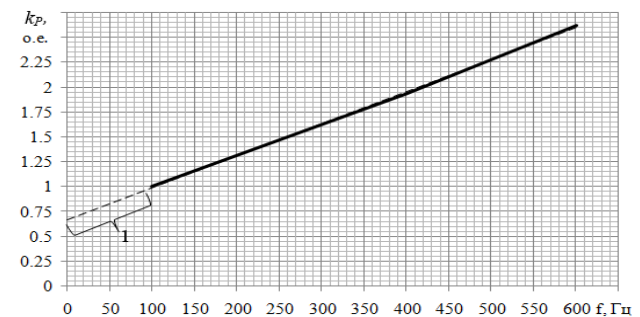


Рис. 2. Изменение коэффициента расширения петли гистерезиса от частоты

изображена на рис. 2. Отрезок 1 является аппроксимацией зависимости на неохваченном экспериментом участке изменения частоты в диапазоне от 0 до 100 Гц.

Потери от гистерезиса пропорциональны квадрату потокосцепления взаимной индукции и частоте основной гармоники поля, а потери от вихревых токов пропорциональны квадрату потокосцепления взаимной индукции и квадрату частоты [13].

Удельные потери на вихревые токи при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц определяются так:

$$P_{вх1,0/50} = \frac{(2\pi \cdot 50)^2 \cdot \Delta^2}{24\rho\gamma}, \quad (5)$$

где  $\Delta$  – толщина стального листа, мм;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление стали, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $\gamma$  – плотность стали, кг/м<sup>3</sup> [14].

Удельные потери на вихревые токи для различных значений частоты переменного тока и

различных значений индукции определяются следующим образом:

$$p_{\alpha} = p_{\alpha 1,0/50} \left( \frac{f}{50} \right)^2 \cdot B^2, \quad (6)$$

где  $f$  – текущее значение частоты перемангничивания, Гц;  $B$  – текущее значение индукции, Тл.

Поскольку в справочной литературе представлены только общие удельные потери в стали, то удельные потери на гистерезис при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц определяются следующим образом:

$$p_{zc 1,0/50} = p_{1,0/50} - p_{zc 1,0/50}, \quad (7)$$

Соответственно удельные потери на гистерезис для различных значений частоты переменного тока и различных значений индукции с введением  $k_p$  определяются как

$$p_{zc} = p_{zc 1,0/50} \left( \frac{f}{50} \right) \cdot B^2 \cdot k_p, \quad (8)$$

Общие удельные потери в стали для различных значений частоты переменного тока и различных значений индукции с введением  $k_p$ :

$$p_y = p_{\alpha 1,0/50} \left( \frac{f}{50} \right)^2 \cdot B^2 + p_{zc 1,0/50} \left( \frac{f}{50} \right) \cdot B^2 \cdot k_p. \quad (9)$$

Это позволяет определить выражение для расчета основных потерь в стали:

$$P_{ст,осн} = (p_{\alpha 1,0/50} \left( \frac{f}{50} \right)^2 + p_{zc 1,0/50} \left( \frac{f}{50} \right) \cdot k_p) \times (k_{Da} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{Dz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}), \quad (10)$$

Таким образом, сформирован подход и получены аналитические выражения для расчета величин основных потерь в стали в частотно-регулируемых асинхронных двигателях.

### Выводы

При увеличении частоты переменного тока происходит расширение петли гистерезиса, что учитывается соответствующим коэффициентом.

Использование такого коэффициента позволяет уточнять величины основных потерь в стали АД при различных значениях частоты переменного тока.

### Список использованной литературы

1. Стаценко, А. В. Расчет электромагнитных потерь энергии в регулируемых асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором [Текст] / А. В. Стаценко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну: – 2013. – Вып. 6. – С. 158–166.
2. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений [Текст] / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков // М., Академия: –2004. – 256 с.
3. Виноградов, А. Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе [Текст] // Электротехника: – 2005. – Вып. 5. – С. 57–62.
4. Зайцев, А. М. Новая серия частотно-регулируемых асинхронных двигателей общего применения разработки ОАО "НИПТИЭМ" [Текст] / А. М. Зайцев, А. В. Захаров, А. С. Кобелев, О. В. Кругликов // Электротехника: – 2008. – Вып. 9. – С. 2–10.
5. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов [Текст]. – М., Высшая школа: – 2000. – 607 с.
6. Семькина, И. Ю. Градиентное управление в решении основных задач электропривода [Текст] // Вестн. КузГТУ: –2010. – Вып. 1. – С. 99–103.
7. Петрушин, В. С. Учебное пособие "Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе" [Текст] // Одесса, Наука и техника: – 2006. – 320 с.
8. Семькина, И. Ю. К вопросу о математическом описании потерь в стали электродвигателей переменного тока [Текст] // Современные проблемы науки и образования: – 2013. – Вып. 5. – С. 26.
9. Дружинин, В. В. Магнитные свойства электротехнической стали [Текст] // Москва; Ленинград: Госэнергоиздат.: – 1962. –320 с.
10. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч.1 [Текст] // М., "Энергия": – 1974. –240 с.
11. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник [Текст] / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат: –1982. –504 с.
12. S. Motoaşcă. Improved evaluation of losses in soft magnetic materials / S. Motoaşcă, E. Helerea,

I.D. Oltean, G. Scutaru // Bulletin of the Transilvania University of Braşov : – 2009. – vol. 2 (51)

13. Виноградов, А. Б. Учет потерь и насыщения стали при оптимальном векторном управлении тяговым асинхронным электроприводом [Текст] / А. Б. Виноградов, Н. Е. Гнездов, Н. А. Глебов, С. В. Журавлев // "Вестник ИГЭУ": – 2012. – Вып. 1. – С. 35–41.

14. ГОСТ 21427.2-83 Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия (с Изменениями N 1-5) Постановлением Госстандарта СССР от 21.06.1983 N 2610ГОСТ от 21.06.1983 N 21427.2-83. [Electronic Resource]. – Access Mode <http://metall-rodon.ru/gost/g21427.2-83.pdf>

### References

1. Statsenko, A. V. (2013), "Calculation of electromagnetic energy loss in the controlled induction motors with squirrel-cage rotor" ["Raschet elektromagnitnykh poter' energii v reguliruemyykh asinkhronnykh dvigateliakh s korotkozamknutyim rotorom"], *Visnik Kiivs'kogo natsional'nogo universitetu tekhnologii ta dizainu*, No. 6, pp. 46-54.

2. Braslavskii, I. Ia., Ishmatov, Z. Sh., Poliakov, V. N. (2004), *Energy-saving asynchronous electric. [Energosberegaiushchii asinkhronnyi elektroprivod]*, Academy Publ. Moscow. 256 p.

3. Vinogradov, A. B. (2005), "Allowance for losses in the steel, saturation and skin effect in the simulation of dynamic processes in the frequency-controlled asynchronous electric" ["Uchet poter' v stali, nasyshcheniia i poverkhnostnogo effekta pri modelirovanii dinamicheskikh protsessov v chastotno-reguliruemom asinkhronnom elektroprivode"], *Elektrotekhnika*, No.5, pp. 57–62.

4. Zaitsev, A. M., Zakharov, A. V., Kobelev, A. S., Kruglikov, O. V. (2008), "New series of variable-speed induction motors general purpose development of "NIPTIEM"" ["Novaia seriia chastotno-reguliruemyykh asinkhronnykh dvigatelei obshchego primeneniia razrabotki OAO "NIPTIEM""], *Elektrotekhnika*, No. 9, pp. 2–10.

5. Kopylov, I. P. (2010), *Electric cars. [Elektricheskie mashiny]*, Vysshaia shkola Publ. M. 607 p.

6. Semykina, I. Iu., "Gradient control in the solution of basic problems of electric" ["Gradientnoe upravlenie v reshenii osnovnykh zadach elektroprivoda"], *Vestn. KuzGTU*, No.1, pp. 99–103.

7. Petrushin, V.S. (2006), *Textbook. Induction motors in adjustable electric [Uchebnoe posobie. Asinkhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode]*, Science and Technology Publ. Odessa. 320 p.

8. Semykina, I. Iu. (2013), "On the question of the mathematical description of the iron loss of AC motors" ["K voprosu o matematicheskom opisani poteri v stali elektrodvigatelei peremennogo toka"], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, No .6, pp. 26.

9. Druzhinin, V.V. (1962), *Textbook. The magnetic properties of electrical steel [Magnitnye svoystva elektrotekhnicheskoi stali]*, Leningrad, Gosenergoizdat. Publ. Moscow. 320 p.

10. Petrov, G.N. (1974), *Textbook. Electric cars. Part 1 [Elektricheskie mashiny. Ch.1]*, Energiia Publ. Moscow. 240 p.

11. Kravchik, A. E., Shlaf, M. M., Afonin, V. I., Sobolenskaia, E.A. (1982), *Induction motors 4A series: Directory [Asinkhronnye dvigateli serii 4A: Spravochnik]*, Energoizdat Publ. Moscow. 504 p.

12. S. Motoaşcă. Improved evaluation of losses in soft magnetic materials / S. Motoaşcă, E. Helerea, I.D. Oltean, G. Scutaru // Bulletin of the Transilvania University of Braşov . – 2009. - vol. 2 (51)

13. Vinogradov, A. B., Gnezdov, N. E., Glebov, N. A., Zhuravlev, S. V. (2012), " Allowance for losses and saturation of steel with optimal vector control asynchronous electric traction " ["Uchet poter' i nasyshcheniia stali pri optimal'nom vektornom upravlenii tiagovym asinkhronnym elektroprivodom"], *Vestnik IGEU*, No.1, pp. 35–41.

14. GOST 21427.2-83 (1983), Electrical steel cold-rolled isotropic. Specifications (Amended N 1-5) Resolution of the State Standard of the USSR 21.06.1983 N 2610GOST from 21.06.1983 N 21427.2-83 [Stal' elektrotekhnicheskaiia kholodnokatanaia izotropnaia tonkolistovaia. Tekhnicheskie usloviia (s Izmeneniiami N 1-5) Postanovlenie Gosstandarta SSSR ot 21.06.1983 N 2610GOST ot 21.06.1983 N 21427.2-83].

## THE SPECIAL FEATURES OF THE CALCULATION OF BASIC IRON LOSSES IN ASYNCHRONOUS MOTOR

V. Petrushin, V. Tchaikovsky, R. Yenoktaiev,  
Odessa National Polytechnic University

**Abstract.** The methods of calculating the basic iron loss asynchronous motors, in which the separation unit losses into two components (the hysteresis and eddy) is introduced coefficient reflecting the expansion of the hysteresis loop. The level of basic iron loss depends primarily on the grade and thickness electrical steel

is used and the magnitude of induction. Each value corresponds to the induction of a specific value of specific losses in the steel. By separating the specific losses into two components determined iron loss at frequencies other than the base, and at nonsinusoidal voltage. Induction in the yoke and the induction in the tines depend on the magnitude of the magnetic flux, the electromotive force which is proportional to the mutual inductance and inversely proportional to frequency. Hence the value of major losses in the steel depends on two variables: the mutual electromotive force and frequency of magnetic reversal. The proposed coefficient reflecting the expansion of the hysteresis loop varies with the frequency of alternating current. Determination of the factor based on experimental data processing. Thus it formed the approach and analytical expressions for calculation of the basic loss of steel, which allows to specify the values in induction motors, including those in regulated.

**Key words:** iron loss, eddy current loss, hysteresis losses, expansion coefficient of the hysteresis loop, mathematical model, controlled induction motor.

## ДО ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ВТРАТ У СТАЛІ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ

**В. С. Петрушин, В. П. Чайковський, Р. М. Єноктаєв**  
Одеський національний політехнічний університет

**Анотація.** Пропонується методика розрахунку основних втрат в сталі асинхронних двигунів, в якій при поділі питомих втрат на дві складові (гістерезисну і вихрову) вводиться коефіцієнт, що враховує розширення петлі гістерезису. Отримано аналітичні вирази для розрахунку основних втрат в сталі, що дозволяє уточнити їх значення в асинхронних двигунах, в тому числі і в регульованих.

**Ключові слова:** втрати в сталі, втрати на вихрові струми, втрати на гістерезис, коефіцієнт розширення петлі гістерезису, математична модель, регульований асинхронний двигун.

Получено 20.12.2016



**Петрушин Виктор Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических машин Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (048)734-8494. E-mail: viktor\_petrushin@ukr.net

**Viktor Petrushin**, Sc. D., head of Electric Cars Department, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ONPU, ph.(048)734-8494. E-mail: viktor\_petrushin@ukr.net

**ORCID ID:** 0000-0003-2659-126X



**Чайковский Владимир Павлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (048)77-97681.

**Vladimir Chaikovskiy**, Ph. D, Electric Cars Department, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ONPU, ph.(048)28-86-81

**ORCID ID:** 0000-0001-6057-7483



**Єноктаєв Ростислав Николаевич**, аспирант Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (097)046-30-70. E-mail: rostik-enok@inbox.ru

**Rostislav Yenkoaiev**, Graduate student of ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ONPU, ph. (097)046-30-70. E-mail: rostik-enok@inbox.ru

**ORCID ID:** 0000-0003-1577-9822