

Р.Н. ЕНОКТАЕВ

КОРРЕКТИРОВКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПОТЕРЬ В СТАЛИ В РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Проведено зіставлення експериментальних і розрахункових енергетичних характеристик регульованого асинхронного двигуна в статичних і динамічних режимах з використанням методики розрахунку основних втрат в сталі, в якій при поділі питомих втрат на дві складові (гістерезисну і вихрову) вводиться коефіцієнт, що враховує розширення петлі гістерезису внаслідок збільшення частоти напруги живлення. Визначено похибки розрахунків втрат активної потужності, ККД двигуна при розрахунку основних втрат в сталі за запропонованою, а також за традиційною методиками.

Ключові слова: асинхронний двигун, частотне керування, втрати в сталі, втрати на вихрові струми, втрати на гістерезис, коефіцієнт розширення петлі гістерезису.

Проведено сопоставление экспериментальных и расчётных энергетических характеристик регулируемого асинхронного двигателя в статических и динамических режимах с использованием методики расчёта основных потерь в стали, в которой при разделении удельных потерь на две составляющие (гистерезисную и вихревую) вводится коэффициент, учитывающий расширение петли гистерезиса вследствие увеличения частоты питающего напряжения. Определены погрешности расчетов потерь активной мощности, КПД двигателя при расчете основных потерь в стали по предлагаемой, а также по традиционной методикам.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, частотное управление, потери в стали, потери на вихревые токи, потери на гистерезис, коэффициент расширения петли гистерезиса.

The experimental and calculated power characteristics of a regulated asynchronous motor are compared in static and dynamic modes using the calculation technique for the main losses in steel, in which, when the specific losses are divided into two components (the hysteresis and eddy), a factor is introduced that takes into account the expansion of the hysteresis loop due to an increase in the frequency of the supply voltage. The errors in calculating the losses of active power, the efficiency of the engine in calculating the main losses in steel according to the proposed, as well as traditional methods, are determined.

Keywords: induction motor, frequency control, iron loss, eddy current losses, hysteresis losses, expansion coefficient of the hysteresis loop.

Введение. Основные потери в стали для двигателей общепромышленного исполнения могут составлять более 20 % полных потерь номинального режима и более 50 % полных потерь холостого хода [1]. При питании двигателей от полупроводниковых преобразователей магнитные потери дополнительно увеличиваются на 5–10 % [2] и уточнение расчета основных потерь в стали регулируемых асинхронных двигателей (РАД) является актуальной задачей. В работах [2, 3] выполняется анализ работы РАД с учетом активного сопротивления ветви намагничивания, соответствующего потерям в стали магнитопровода, определяемого традиционным методом.

Постановка задачи. Особенностью учета основных потерь в стали частотно-регулируемых асинхронных двигателей (АД) является необходимость их расчета в разных точках диапазона регулирования, характеризующихся различными значениями величин и частот питающего напряжения в соответствии с используемым законом частотного регулирования. Уровень основных потерь в стали зависит от марки и толщины используемой электротехнической стали (ЭТС) и от величины магнитной индукции. Каждому значению магнитной индукции соответствует определенное значение удельных потерь в стали p_{y0} [4].

Можно воспользоваться традиционной методикой определения потерь в стали [5]:

$$P_{\text{ст,осн}} = p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^\beta \cdot (k_{\text{да}} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\text{де}} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}), \quad (1)$$

где $p_{1,0/50}$ – общие удельные потери при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц, Вт/кг;

β – показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания ($\beta = 1,3–1,5$);

$k_{\text{да}}, k_{\text{де}}$ – 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.

В отличие от общепромышленных АД в РАД следует учитывать не только потери в магнитопровode статора, но и в магнитопровode ротора. Это связано с тем, что при глубоком регулировании частота перемагничивания ротора может иметь существенные значения.

Возможно разделение удельных потерь в стали на две составляющие:

– вихревую

$$p_{\text{вх},0/50} = \frac{(2\pi \cdot 50)^2 \cdot \Delta^2}{24\rho\gamma}, \quad (2)$$

где Δ – толщина стального листа, мм;

ρ – удельное электрическое сопротивление стали, Ом·мм²/м;

γ – плотность стали, кг/м³;

– гистерезисную $p_{\text{гс}}$. В справочной литературе представлены только общие удельные потери в стали,

© Р.Н. Еноктаев, 2018

а удельные потери на гистерезис при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц определяются следующим образом:

$$P_{\text{гс},1,0/50} = P_{1,0/50} - P_{\text{вх},1,0,50} \quad (3)$$

За счет этого разделения при определении основных потерь в стали при частотах отличных от базовых введением коэффициента k_p учитывается расширение петли гистерезиса. Определение коэффициента основывалось на обработке экспериментальных данных, исходя из рис. 1. Аналогичное расширение петель гистерезиса наблюдается и в других марках ЭТС [6, 7].

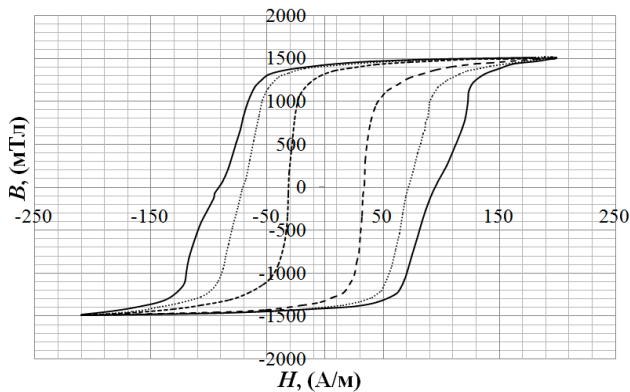


Рис. 1 – Семейство петель гистерезиса для листа ЭТС марки М5Т23 толщиной 0,23мм: — 100 Гц; 400 Гц; — 600 Гц

Тогда выражение для расчета основных потерь в стали выглядит следующим образом:

$$P_{\text{ст,осн}} = (p_{\text{вх},1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right)^2 + p_{\text{гс},1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right) \cdot k_p) \times (k_{\text{да}} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\text{дз}} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}). \quad (4)$$

Целесообразно проанализировать с какими погрешностями рассчитываются характеристики АД в статических и динамических режимах при разделении удельных потерь на две составляющие, а также введении коэффициента, учитывающего расширение петли гистерезиса.

Основные соотношения для РАД при различных законах частотного управления могут быть получены при использовании Т-образной эквивалентной схемы замещения двигателя с изменяющимися при частотном управлении параметрами (см. рис.2).

При использовании преобразователей частоты (ПЧ) – источников регулируемого напряжения величина приложенного к двигателю напряжения оценивается относительной величиной $\gamma = U_1/U_{1N}$ – отношением текущего и номинального напряжений питания двигателя. В этой схеме все сопротивления, за исключением активных сопротивлений обмоток статора r_1 и ротора r_2' , изменяются пропорционально параметру регулирования $\alpha = f_1/f_{1N}$, где f_1 и f_{1N} – текущее и номинальное значения частоты

преобразователя соответственно [8]. Взаимосвязанное управление напряжением и частотой преобразователя, задаваемое законом частотного управления, при законах первого уровня определяется соотношениями: $\gamma = \alpha$, при $U/f = \text{const}$, $\gamma = \alpha^2$ при $U/f^2 = \text{const}$ и т. д. Приведенное активное сопротивление, эквивалентное нагрузке на валу двигателя, зависит от параметра регулирования α и параметра абсолютного скольжения $\beta = f_2/f_{1N} = \alpha \cdot s$, где f_2 – частота тока ротора, s – его скольжение.

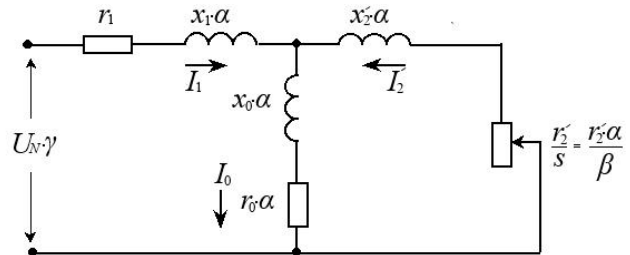


Рис. 2 – Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя с изменяющимися при частотном управлении параметрами

При оценке энергоэффективности используется среднечастотный КПД [10], отражающий энергетику РАД во всем диапазоне регулирования от n_1 до n_2 :

$$\eta_{\text{срАД}} = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \int_{n_1}^{n_2} \eta_{\text{АД}}(n) \cdot dn. \quad (5)$$

Математические модели, используемые для исследования переходных электромагнитных и электромеханических процессов в РАД, основаны на системах нелинейных дифференциальных уравнений равновесия напряжений и токов в системе преобразованных координат, что подробно описано в [8].

Материалы и результаты исследований. С помощью программного продукта DIMASDrive [9], разработанного на кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета, обеспечивается моделирование с использованием традиционной и предлагаемой методик расчета основных потерь в стали.

Рассмотрен наиболее распространенный привод с транзисторным ПЧ с автономным инвертором напряжения и ШИМ-регулированием при законе частотного управления $U/f = \text{const}$. Транзисторный частотный преобразователь Altivar 28 Telemecanique обеспечивал питание асинхронного двигателя АИР71А2. Входное сетевое линейное напряжение во время эксперимента составляло 380 В. Преобразователь имел следующие настройки: $U_N = 220$ В и $f_N = 50$ Гц, частота модуляции 4 кГц. В результате теоретических и экспериментальных исследований получены характеристики для параметров регулирования 30 и 50 Гц. В процессе эксперимента осциллографировались токи и напряжения с помощью устройства BORDO-421 и затем, с использованием разработанной на базе MATLAB программы «Обработка результатов», было

произведено построение в функции времени кривых изменения анализируемых переменных.

На рис. 3, 4 представлены зависимости потерь двигателя от момента.

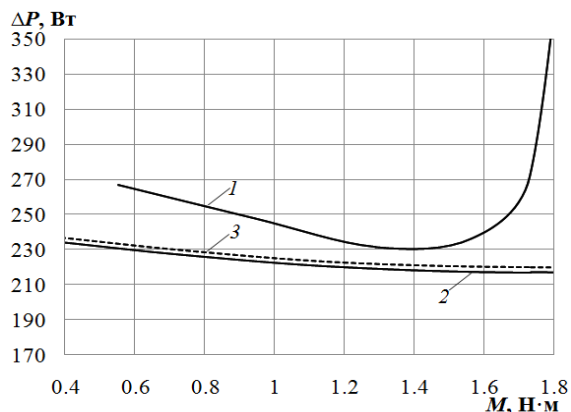


Рис. 3 – Изменение суммарных потерь двигателя при частоте 30 Гц: 1 – эксперимент; 2 – моделирование с использованием традиционной методики расчета потерь в стали; 3 – моделирование с использованием предлагаемой методики расчета потерь в стали

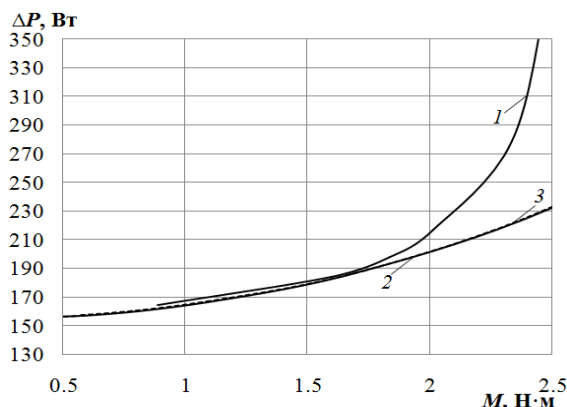


Рис. 4 – Изменение суммарных потерь двигателя при частоте 50 Гц: 1 – эксперимент; 2 – моделирование с использованием традиционной методики расчета потерь в стали; 3 – моделирование с использованием предлагаемой методики расчета потерь в стали

В табл.1 приведено значение среднediaпазонного КПД. В рассматриваемом случае выбран диапазон 1725–2890 об/мин, что соответствует изменению частоты питающего двигателя напряжения от 30 Гц до 50 Гц.

Таблица 1 – Среднediaпазонный энергетический показатель

Показатель	Методика		Эксперимент
	традиционная	предлагаемая	
$\eta_{\text{ср.АД}}, \%$	69,79	69,56	63,90

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования динамических характеристик двигателя АИР71А2, при работе на заданную тахограмму (2,6 с – 1792 об/мин; 2,9 с – 2932 об/мин).

Момент нагрузки на валу имел линейную зависимость от частоты вращения, что описывалось

уравнением $M(n) = 0,2 + 0,825 \cdot n \cdot 10^{-3}$. На рис. 5 представлены результаты теоретического (по разным методикам) и экспериментального исследований.

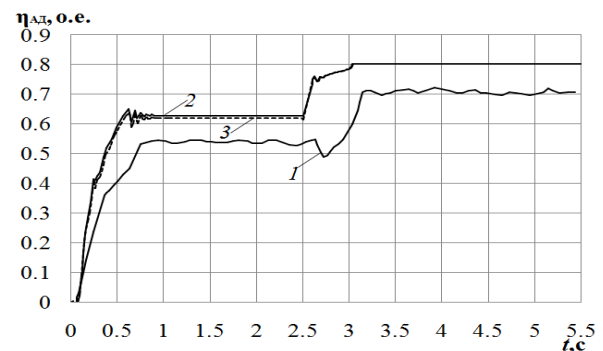


Рис.5 – Зависимости КПД двигателя: 1 – эксперимент; 2 – моделирование с использованием традиционной методики расчета потерь в стали; 3 – моделирование с использованием предлагаемой методики расчета потерь в стали

Выводы.

1. Зависимости суммарных потерь двигателя и соответственно КПД двигателя различны с использованием традиционной и предлагаемой методик расчета основных потерь в стали.

2. Выявлено увеличение погрешностей определения суммарных потерь двигателя при моделировании с использованием традиционной методики расчета основных потерь в стали (при частоте 30 Гц средняя погрешность 9,26 % в диапазоне изменения момента нагрузки 0,6–1,6 Н·м) по сравнению с использованием предлагаемой методики расчета основных потерь в стали (средняя погрешность 7,56 % в диапазоне изменения момента нагрузки 0,6–1,6 Н·м).

3. Наблюдается близость значений суммарных потерь двигателя при теоретических исследованиях на 50 Гц (см. рис. 4), вследствие того, что при номинальной частоте питающего двигателя напряжения коэффициент расширения петли гистерезиса равен 1.

4. Введение коэффициента расширения петли гистерезиса имеет большее влияние на характеристики АД при частотах питания двигателя, отличных от номинальных.

5. Вышеприведенные погрешности существенно снижаются при проведении расчетов с учетом пространственно-временных гармонических составляющих [10].

6. Аналогичные результаты получены при анализе динамических режимов.

7. Энергетические показатели работы РАД уточняются при использовании предлагаемой методики расчета основных потерь в стали.

Список литературы

- Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
- Семькина И. Ю. К вопросу о математическом описании потерь в стали электродвигателей переменного тока / И. Ю. Семькина

- // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №.5. – С.26.
- Петрушин В.С. Уточнения характеристик регулируемых асинхронных двигателей при учете активного сопротивления ветви намагничивания / В.С. Петрушин, Ю.Р. Плоткин, Р.Н. Еноктаев // Научно-практический журнал «Электротехнические та комп'ютерні системи». – 2017. – №25 (101). – С. 118-124.
 - ГОСТ 21427.2-83 Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия (с Изменениями N 1-5) Постановление Госстандарта СССР от 21.06.1983 N 2610ГОСТ от 21.06.1983 N 21427.2-83. – Режим доступа: <http://metall-rodon.ru/gost/g21427.2-83.pdf>. – Дата обращения: 05 сентября 2017.
 - Копылов И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2000. – 607 с.
 - 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).
 - Петрушин В.С. К особенностям расчета основных потерь в стали в асинхронных двигателях / В.С. Петрушин, В.П. Чайковский, Р.Н. Еноктаев // Научно-практический журнал «Электротехнические та комп'ютерні системи». – 2017. – №24 (101). – С. 46-50.
 - Петрушин В.С. Учебное пособие «Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе» / В.С. Петрушин // Одесса, Наука и техника. – 2006. – 320 с.
 - Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт «DIMASDrive». Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). Киев: Министерство образования и науки Украины. Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.
 - Петрушин В.С. Учет потерь от высших гармонических в регулируемых асинхронных двигателях / В.С. Петрушин, Р.Н. Еноктаев, О.И. Шестаков, Н.С. Прокопенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2017. – №1 (1223). – С. 101-105.
 - mathematical description of the iron loss of AC motors], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*. 2013, no.6, pp. 26.
 - Petrushin V.S., Plotkin Iu.R., Enoktaev R.N. Utochneniia kharakteristik reguliruemyykh asinkhronnykh dvigatelei pri uchete aktivnogo soprotivleniia vetvi namagnichivaniia [Specification of the characteristics of adjustable asynchronous motors when taking into account the active resistance of the magnetization branch]. *Naukovo-praktichii zhurnal «Elektrotekhnichni ta komp'uterni sistemi»*. 2017, no.25 (101), pp. 118-124.
 - GOST 21427.2-83. Stal' elektrotekhnicheskaia kholodnokatanaia izotropnaia tonkolistovaia. Tekhnicheskie uslovia (s Izmeneniami N 1-5) Postanovlenie Gosstandarta SSSR ot 21.06.1983, N 2610GOST ot 21.06.1983 N 21427.2-83 [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].
 - Kopylov I. P. *Elektricheskie mashiny* [Electric cars]. Vysshiaia shkola Publ. 2010, Moscow. 607 p.
 - S. Motoaşcă, E. Helerea, I.D. Oltean, G. Scutaru. Improved evaluation of losses in soft magnetic materials. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*. 2009, no 2 (51).
 - Petrushin V.S., Chaikovskii V.P., Enoktaev R.N. K osobennostiam rascheta osnovnykh poter' v stali v asinkhronnykh dvigateliakh [The special features of the calculation of basic iron losses in asynchronous motor]. *Naukovo-praktichii zhurnal "Elektrotekhnichni ta komp'uterni sistemi"*. 2017, no.24, (101), pp. 46-50.
 - Petrushin V.S. *Asinkhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode* [Induction motors in the regulated electric drive]. Science and Technology Publ. Odessa. 2006, 320 p.
 - Petrushin V.S., Rjabinin S.V. and Iakimets' A.M. Programnyi produkt «DIMASDrive». Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniia asinhronnykh korotkozamknytykh dvigatelej sistem reguliruemogo jelektro-privoda [«DIMASDrive» software product. program performance analysis, selection and design of asynchronous motors short-regulated electric drive systems]. Patent UA, no. 4065. CD.
 - V.S. Petrushin, R.N. Enoktaev, O.I. Shestakov, N.S. Prokopenko. Uchet poter' ot vysshikh garmonicheskikh v reguliruemyykh asinkhronnykh dvigateliakh [Allowance for loss of the higher harmonic in the controlled induction motors]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI»*. Serii: *Elektrichni mashini ta elektromekhanichne peretvorenna energii*. 2017, no 1(1223), pp. 101-105.

Reference (transliterated)

- Braslavskii I. Ia., Ishmatov Z. Sh., Poliakov V. N. *Energoberegaiushchii asinkhronnyi elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric]. Academy Publ. Moscow. 2004, 256 p.
- Semykina I. Iu. K voprosu o matematicheskom opisani poter' v stali elektrodvigatelei peremennogo toka [On the question of the

Поступила (received) 19.02.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Коригування розрахунку основних втрат у сталі в регульованих асинхронних двигунах / Р.М. Єноктаєв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – №5 (1281). – С. 55–58. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

Корректировка расчета основных потерь в стали в регулируемых асинхронных двигателях / Р. Н. Еноктаев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – №5 (1281). – С. 55–58. Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

Correction of the calculation of the main losses in steel in controlled induction motor / R.N. Yenoktaiev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 55–58. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єноктаєв Ростислав Миколайович, аспірант Одеського національного політехнічного університета, 65044, Одеса, проспект Шевченка, 1, ОНПУ, тел. (097)046-30-70; e-mail: rostik-enok@ukr.net

Еноктаев Ростислав Николаевич, аспирант Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (097)046-30-70; e-mail: rostik-enok@ukr.net

Yenoktaiev Rostislav Nikolaievich, postgraduate at the Department of Electric Cars, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av., 1, ONPU, ph. (097)046-30-70; e-mail: rostik-enok@ukr.net