

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В СТАЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Огарь В.А.

Кременчугский государственный политехнический университет им. М. Остроградского

*In work are analysed possible approximation dependencies for estimation of the losses in become anisochronous engine, as well as is offered method on determination of the losses in become anisochronous motor with provision for real physical processes, running in electric machine. The got result in type of the rectilinear dependency of the losses in become from e.d.s. sidebar of the magnetization possible to use at building of the systems of the regulation energy mode anisochronous motor.*

**Введение.** Вопрос оценки потерь в стали асинхронного двигателя является актуальным до настоящего времени. В литературных источниках [1-3] приведены различные выражения, с помощью которых предложено рассчитывать потери в стали. Однако, несмотря на этот факт, исследователи в своих работах возвращаются к этому вопросу. В первую очередь, это связано с неучетом реальных физических явлений, таких как насыщение, вихревые токи, протекающих в стали асинхронного двигателя. Существует экспериментальный метод, с помощью которого определение потерь в стали предлагается производить с использованием квадратичной зависимости от прикладываемого напряжения [4], но проведенные исследования [5] указывают на ошибочность такого представления, в особенности при насыщении стали.

В связи с этим, **цель работы** заключается в анализе аппроксимационных зависимостей для оценки потерь в стали асинхронного двигателя и разработке метода по определению потерь в стали АД с учетом реальных физических процессов, протекающих в электрической машине.

**Материал исследований.** Анализ возможных аппроксимационных зависимостей для определения потерь в стали рассмотрим на основании экспериментальных данных, полученных с использованием установки, функциональная схема которой приведена на рис. 1.

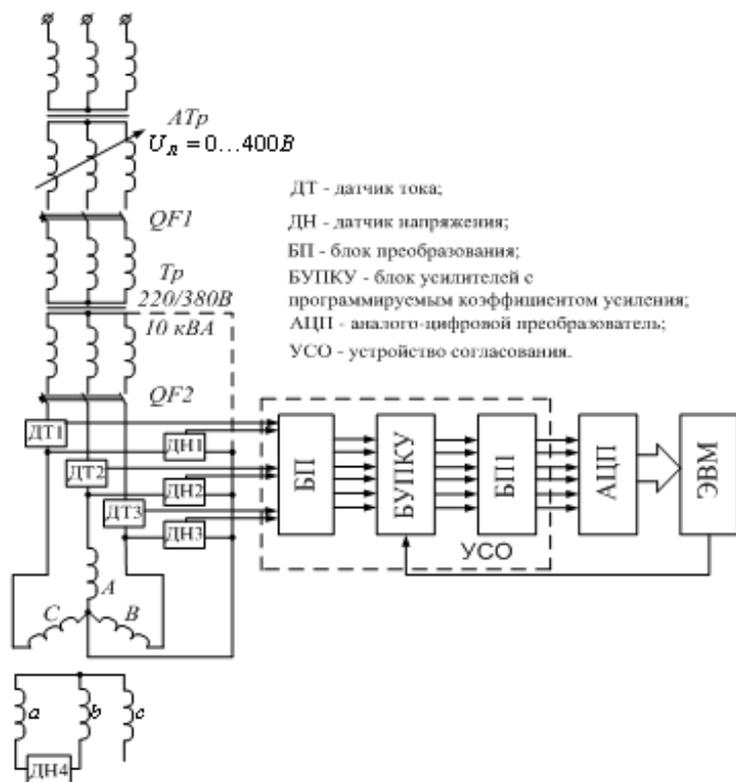


Рисунок 1 - Функциональная схема экспериментальной установки для исследования асинхронного двигателя

дифференциальный сигнал для улучшения помехозащищенности передачи данных, и аналого-цифровой преобразователь, поступают на ЭВМ, где с помощью специального программного обеспечения производится их дальнейшая обработка.

Варьируя напряжение в пределах от (110÷570) В с использованием измерительно-диагностического комплекса [6] осуществлена запись массива данных напряжения и тока для дальнейшего расчета потерь. Кривые тока и напряжения для всех фаз асинхронного двигателя для напряжения  $U = 550$  В, представлены на рис. 2-3.

В состав экспериментальной установки входят: повышающий автотрансформатор  $ATp$ , позволяющий регулировать линейное напряжение в пределах до 400 В; трансформатор  $Tr$ , позволяющий увеличить пределы изменения напряжения до 700 В для получения режима насыщения двигателя; датчики тока  $DT$  типа LA25NP, работающие на эффекте Холла; датчики напряжения  $DN$  типа LV25P; аналого-цифровой преобразователь (АЦП) типа L780, с разрядностью 14 бит и максимальной частотой преобразования 400 кГц. К установке подключается исследуемый двигатель, с номинальными данными  $P_n = 1.4$  кВт;  $n_n = 885$  об/мин;  $I_n = 9.2$  А и параметрами схемы замещения  $R_1 = 5.107$  Ом,  $R_2 = 1.424$  Ом,  $L_1 = 0.016$  Ом.

Сигналы с датчиков электрических величин через устройство согласования (УСО), в состав которого входят усилители с программируемым коэффициентом усиления и устройства, преобразующие сигнал с общей землей в

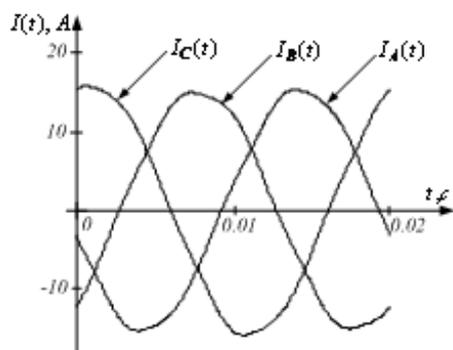


Рисунок 2 - Экспериментальные кривые тока фаз асинхронного двигателя

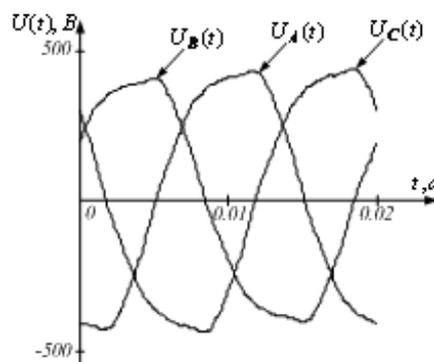


Рисунок 3 - Экспериментальные кривые напряжения фаз асинхронного двигателя

Потери в стали рассчитаны, исходя из следующих соотношений. Для каждой фазы находится мощность источника. Так, для фазы А получим:  $P_{иА} = \frac{1}{T} \int_0^T (U_A(t) \cdot I_A(t)) dt$ . Суммарная мощность источника при этом

равна:  $P_{и\Sigma} = P_A + P_B + P_C$ . Потери на активном сопротивлении статора фазы А рассчитаны согласно выраже-

ния:  $P_{РА} = \frac{1}{T} \int_0^T (I_A^2(t) R) dt$ . Потери мощности всех фаз на активном сопротивлении:

$P_{R\Sigma} = P_{РА} + P_{RB} + P_{RC}$ . Сумма потерь в стали и механических определена так:

$P_c + P_{мех} = \frac{1}{T} \int_0^T (P_{и\Sigma} - P_{R\Sigma}) dt$ , где  $T$  - период сигнала. Разделение суммы потерь в стали и механических на

отдельные составляющие осуществлено по зависимости этой суммы от приложенного напряжения. Величина механических потерь определяется путем экстраполяции нижней прямолинейной части этой зависимости на нулевое значение приложенного напряжения [7]. Механические потери для рассматриваемого случая равны:  $P_{мех} = 64.97$  Вт.

Задача аппроксимации состоит в том, что для функции, заданной таблично, необходимо найти зависимость, значения которой мало бы отличались от экспериментальных данных. Функция, которая приближает табличную (полученную экспериментально) называется эмпирической формулой или эмпирической зависимостью [8].

В результате применения аппроксимации функций получена следующая аппроксимационная зависимость:

$$P_c(x) = ax + bx^2 + cx^3 + dx^4, \quad (1)$$

где  $a, b, c, d$  - коэффициенты аппроксимации,  $x$  - изменяемая функция.

Рассмотрены возможные варианты изменения  $x$  :

- |  |   |
|--|---|
| 1 - при $x = U_{эфф}$ аппроксимационные коэффициенты получим в виде: | - при $x = I_{эфф}$ :                     |
| $a = 0.26025891$ ; $b = -0.0014343352$ ;                             | $a = 6.5941315$ ; $b = 4.6167482$ ;       |
| $c = -1.3723719 \cdot 10^{-6}$ ; $d = 4.7672419 \cdot 10^{-8}$ .     | $c = -0.12370164$ ; $d = -0.0044437515$ . |
| 2 - при $x = U_1$ :  | 4 - при $x = I_1$ :                       |
| $a = 0.17547391$ ; $b = -0.00059043743$ ;                            | $a = 4.7025737$ ; $b = 2.3027251$ ;       |
| $c = -1.0890096 \cdot 10^{-6}$ ; $d = 1.2884865 \cdot 10^{-8}$ .     | $c = -0.013374407$ ; $d = -0.0011179826$  |

Основываясь на данных эксперимента и используя полученные аппроксимационные выражения, построены зависимости потерь в стали от напряжения и тока. На рис. 4-5 цифре «1» соответствует зависимость потерь в стали от действующего значения напряжения  $P_{ст} = f(U_{эфф})$  или тока  $P_{ст} = f(I_{эфф})$ ; «2» - зависимость потерь в стали от значения первой гармоники напряжения  $P_{ст} = f(U_1)$  или тока  $P_{ст} = f(I_1)$ . Как видно из полученных графиков, потери в стали как в функции напряжения, так и в функции тока описываются с по-

мощью полиномиальной зависимости, меняются лишь значения аппроксимационных коэффициентов при изменении функции.

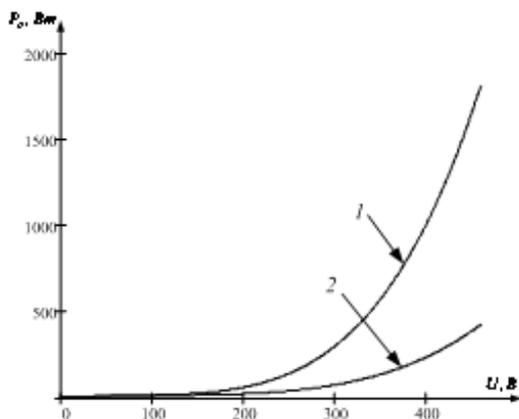


Рисунок 4 – Зависимости потерь в стали в функции напряжения

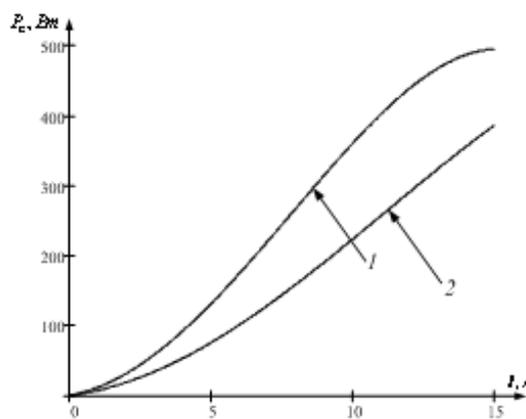


Рисунок 5 – Зависимости потерь в стали в функции тока

В связи с тем, что при протекании тока через нелинейный элемент вес высших гармоник становится существенным [9], необходимо выполнить анализ потерь в стали в функции высших гармоник тока. Для этого составлена система алгебраических уравнений для каждого уровня напряжения ( $n$  значений) в виде:

$$P_{стn} = a_1 I_{1n}^2 + a_2 I_{3n}^2 + a_3 I_{5n}^2 + a_4 I_{7n}^2 + a_5 I_{9n}^2. \quad (2)$$

Решив ее относительно неизвестных коэффициентов  $a_1 \div a_5$ , получим зависимость потерь в стали в функции гармонических составляющих тока. Для рассматриваемого случая будет:

$$P_{ст} = 8.74 I_1^2 + 778.377 I_3^2 + 169.69 I_5^2 + 268.105 I_7^2 - 638.64 I_9^2. \quad (3)$$

Анализ экспериментальных данных показывает, что уровень гармоник тока в первичной цепи двигателя незначителен даже при напряжениях, существенно превышающих номинальное. Анализ этого вопроса приводит к выводу о том, что при насыщении стали этот элемент является источником высших гармоник, что полностью соответствует существующим теоретическим представлениям. В исследованиях, однако, не учитывается тот факт, что гармоники тока, формируемые в контуре намагничивания, замыкаются по двум цепям – по статорной цепи и по цепи ротора. Следовательно, измеренные гармоники в статорной цепи представляют лишь часть общей составляющей. Именно по этой причине оценка потерь в стали через составляющие тока статора не является объективной.

Проанализировав аппроксимационные зависимости потерь в стали, очевидно, что возможны различные варианты определения потерь в стали с использованием функциональных зависимостей. Каждая из них имеет свою степень сложности при ее использовании в дальнейших расчетах. Однако, следует отметить, что ни одна из этих зависимостей не объясняет физику процесса, протекающего в нелинейной цепи. В связи с этим, развитием проведенного анализа возможных вариантов представления потерь в стали является формирование подхода по их определению с учетом реальных физических явлений, протекающих в асинхронном двигателе.

По мнению автора, этот подход будет заключаться в оценке потерь в стали в функции эквивалентной э.д.с. контура намагничивания:

$$\Delta P_{ст}(t) = c' \cdot E(t)^2, \quad (4)$$

Для получения зависимости э.д.с., наводимой в электрической машине проведен опыт, при работе асинхронного двигателя в режиме разомкнутого ротора. Сигнал э.д.с. представлен на рис. 6.

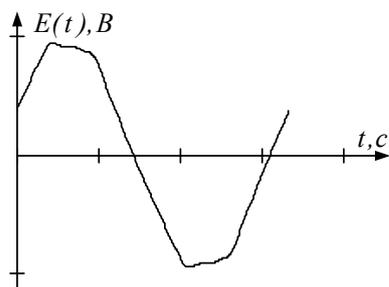


Рисунок 6 - Зависимость э.д.с. на периоде, при прикладываемом напряжении 480В

Временную зависимость э.д.с. раскладываем в ряд Фурье для получения гармонических составляющих. Для каждого уровня напряжения рассчитываем потери в стали (табл. 1).

Таблица 1 - Рассчитанные потери в стали асинхронного двигателя

$U, В$	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	360
$P_{ст}, Вт$	0,629	2,028	4,041	5,944	8,631	10,4	13,6	15,8	20,3	25,7	30,19	38,16	47,72	50,36
$U, В$	370	380	390	400	410	420	430	440	460	470	480	490	500	510
$P_{ст}, Вт$	56,84	66,27	72,54	81,49	92,18	109	117,9	137,7	167,8	194,7	220,5	232,6	257,9	289

Сигнал э.д.с., полученный в ходе экспериментальных исследований является лишь одной из составляющей общей э.д.с.. Вторая составляющая э.д.с., появляющаяся в результате наличия нелинейного элемента в системе, приведет к появлению второго слагаемого при нахождении общей э.д.с. системы. В результате получим выражение для расчета общей э.д.с. в виде:

$$E_v = E_{v\_изм} + vI_v(x_1 + x_\mu), \quad (5)$$

где  $E_{v\_изм}$  - э.д.с.  $v$ -ой гармоники, измеренной в результате эксперимента;  $v$  - номер гармоники,  $I_v$  - ток  $v$ -ой гармоники;  $x_1$ ,  $x_\mu$  - индуктивное сопротивление статорного контура и контура намагничивания соответственно.

Согласно (5) пересчитываем э.д.с. каждой из высших гармоник для измеренных уровней напряжений и находим коэффициент  $E'^2 = E_1^2 + 3^2 E_3^2 + \dots + v^2 E_v^2$  для исследуемого асинхронного двигателя. Последним этапом в рассуждениях является построение зависимости потерь в стали в функции э.д.с.  $E'^2$  (рис. 7).

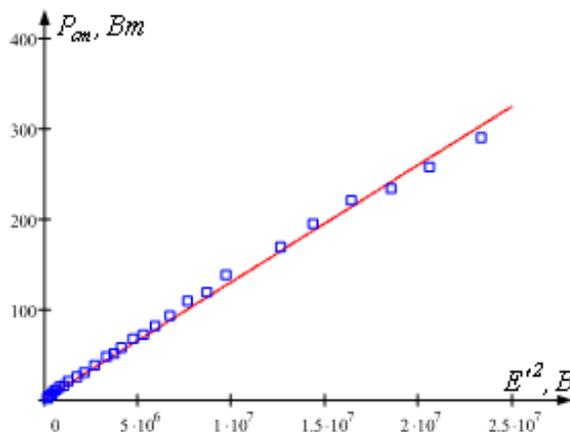


Рисунок 7 - Зависимость потерь в стали асинхронного двигателя в функции э.д.с.  $E'^2$

**Выводы.** В работе проведен анализ возможных аппроксимационных зависимостей, базирующийся на экспериментальных исследованиях, позволяющих получить выражение для определения потерь в стали. Ни одна из зависимостей не объясняет физику процессов, протекающих в нелинейной цепи. В работе представлен метод оценки потерь в стали в функции э.д.с., учитывающий высшие гармоники тока, появляющиеся из-за наличия нелинейного элемента в системе. Получено, что потери в стали пропорциональны квадрату частоты и сумме произведения квадратов гармоник э.д.с. на квадрат их порядкового номера. Полученные результаты в виде прямолинейной зависимости можно использовать при построении систем регулирования энергетических режимов асинхронного двигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, т.2. Л.: - Энергоиздат, 1981, 416с.
2. Лившиц М. Электрические машины, т. 3, М. 1936. – 410 с.
3. Костенко М.В. Электрические машины. – М.: Госэнергоиздат, 1944. – 815 с.
4. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. Москва, 1987.
5. Огарь В.А., Родькин Д.И., Калинов А.П. Обоснование аналитической оценки потерь в насыщаемой стали асинхронного двигателя / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Випуск 4/2007 (45). Частина 1 - С. 98-103.
6. Гладырь А.И., Родькин Д.И., Здор И.Е. и др. Возможности компьютеризированных измерительно-диагностических комплексов при решении задач электромеханики. // Вісник КДПУ, 1/2000, С. 119-123.
7. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 408 с.
8. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978, 512 с.
9. Родькин Д.И., Мартыненко В.А., Барвинок Д.В., Гераскин А.С. Энергопроцессы в асинхронном двигателе с насыщенной сталью. // Вісник КДПУ, 1/2002, С.174-180.

Рекомендовано д.т.н. Сивокобиленко В.Ф.