

Мугалимов Р.Г.<sup>1</sup>, Закирова Р.А.<sup>1</sup>, Мугалимова А.Р.<sup>2</sup>, Боков А.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

<sup>2</sup> ООО НИиОКБ «Энергосбережение», г. Магнитогорск

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛИ СТАТОРА ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ И МОДЕРНИЗАЦИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлены результаты исследований стали статора асинхронных двигателей при капитальном ремонте на электроремонтном предприятии. Разработаны методика, аппаратные и программные средства для испытания качества стали статора асинхронных машин с извлеченным ротором. Методика испытания предусматривает оценку качества стали статора путем ее намагничивания эталонным напряжением и током, пропорциональным проектной магнитной индукции и напряженности поля в спинке стали статора, регистрацию сигналов напряжения и тока намагничивания, мощности потерь в стали. Регистрируемые сигналы напряжения и тока оцифровываются. Разработано программное средство, позволяющее анализировать оцифрованные сигналы по пяти критериям: сдвиг фаз напряжения и тока намагничивания, равный разности фаз напряжения и тока, определяемых по их максимальным значениям; приращение тока намагничивания, равное разности максимального значения тока и тока при фазе напряжения, равной  $90^\circ$ ; потери активной мощности в стали статора; сдвиг начальных фаз напряжения и тока намагничивания; гармонический состав тока намагничивания. Предложены логические уравнения, аргументами которых являются перечисленные критерии, позволяющие без участия человека принимать решения о качестве стали статора: или сталь хорошая, или удовлетворительная, или плохая. В работе приведены: электрическая схема аппаратной части устройства для испытания стали статора; описан алгоритм обработки оцифрованных сигналов; результаты экспериментальных исследований стали статора асинхронных двигателей типа АИ225М8УЗ, мощностью 30 кВт, частотой вращения 735 об/мин. Методика, аппаратный и программный комплекс позволяют оценивать качество стали статора каждого ремонтируемого двигателя, выполнить ремонт двигателей с минимальными трудовыми и материальными затратами. Разработка рекомендуется специалистам электроремонтных предприятий.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, сталь статора, критерии качества стали, методика испытания, осциллограмма, аппаратный комплекс, программа для ЭВМ.

### ВВЕДЕНИЕ

На промышленных предприятиях РФ по экспертным оценкам в эксплуатации электротехнических комплексов находится не менее 180 млн единиц асинхронных двигателей [1, 2]. Ежегодно от 3 до 7 % этого парка электрических машин выходит из строя и проходит капитальный ремонт с заменой обмотки статора [3-5]. На большинстве электроремонтных предприятий РФ извлечение обмотки статора из пазов стали статора осуществляется после отжига статора при температуре  $370-380^\circ\text{C}$ . В результате термического воздействия сталь статора частично теряет свои магнитные свойства. При замене обмотки статора, как правило, количественно не учитывают снижение магнитного свойства стали, а ремонт выполняют с сохранением заводских обмоточных данных: числа витков; диаметра обмоточного провода; схемы укладки обмотки. После такого капитального ремонта рабочие и механические характеристики двигателя ухудшаются – снижаются КПД,  $\cos\phi$  и другие показатели, что невыгодно для собственника электрической машины. Иногда капитально отремонтированный двигатель выходит из строя до окончания гарантийного срока. Это ведет к повторению ремонта, а следовательно, к дополнительным затратам трудовых и материальных ресурсов, что является экономически невыгодно для электроремонтного предприятия.

В данной работе предлагаются методика, аппаратные и программные средства, а также результаты

исследования стали статора при капитальном ремонте и модернизации асинхронного двигателя. Сущность методики заключается не только в визуальной, но и инструментальной оценки состояния стали статора каждого ремонтируемого двигателя. С учетом реального магнитного состояния стали осуществляется пересчет номинальной мощности, числа витков и диаметра провода обмотки статора. Методика экспериментальной оценки состояния стали статора изложена в публикации [1]. Однако данная методика предусматривает обработку осциллограмм напряжения и тока намагничивания человеком-оператором. Это трудоемко, ограничивает пропускную способность участка по исследованию стали статора и вносит ошибки, обусловленные человеческим фактором, в принятии решений о качестве стали, выборе технологии ремонта и модернизации электрической машины.

Известны методики обработки осциллограмм электрических сигналов программными средствами [6-9]. Эти методики ориентированы преимущественно для электрических сигналов линейных электрических цепей. Асинхронный двигатель является нелинейной электромагнитной системой, обусловленной наличием электротехнической стали. Главной характеристикой электротехнической стали является зависимость магнитной индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$ , т.е. кривая намагничивания [10,11]. На **рис. 1** приведены кривые намагничивания спинки стали статора, применяемые при проектировании асинхронных двигателей [2, 12].

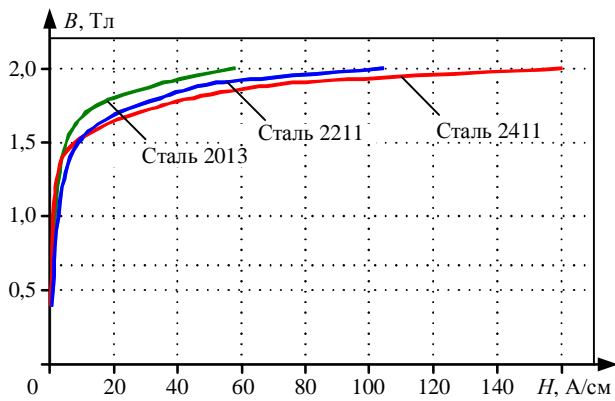


Рис. 1. Кривые намагничивания спинки стали статора

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СТАЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Целью данной разработки является автоматизация обработки осциллограмм напряжения и тока намагничивания стали статора с применением программного средства. Задачей данной работы является разработка аппаратно-программного комплекса, критериев и логических уравнений для оценки качества стали статора при капитальном ремонте или модернизации асинхронного двигателя в условиях электроремонтного предприятия.

Методика предусматривает, кроме визуальной оценки, оценивать качество стали статора по объективным критериям, полученным в результате обработки оцифрованных сигналов напряжения и тока намагничивания.

На рис. 2 представлены типичные формы осциллограмм сигналов напряжения и тока намагничивания стали статора, получаемые инструментальным исследованием.

Главными критериями оценки исследуемой стали являются [1]:

1) сдвиг фаз  $\varphi$ , равный разности фаз напряжения  $\psi_U$  и тока  $\psi_I$ , определяемых по их максимальным значениям на интервалах  $0 - T/2, T/2 - T$ :

$$\varphi = \psi_U - \psi_I; \tag{1}$$

2) приращение тока намагничивания  $\Delta i$ , равное разности максимального значения тока  $i_{max}$  и тока  $i_{\psi U 90^\circ}$  при  $\psi_U = 90^\circ$ :

$$\Delta i = i_{max} - i_{\psi U 90^\circ}; \tag{2}$$

3) потери активной мощности в стали статора  $\Delta P_c$ :

$$\Delta P_c = UI \cos \varphi; \tag{3}$$

где  $U, I$  – действующие значения напряжения и тока намагничивания;

4) сдвиг начальных фаз  $\varphi_{нач}$ , равны разности начальных фаз напряжения  $\psi_{Uнач}$  и тока намагничивания  $\psi_{Iнач}$ :

$$\varphi_{нач} = \psi_{Uнач} - \psi_{Iнач}; \tag{4}$$

5) гармонический состав тока намагничивания, определяемый методом полного преобразования Фурье.

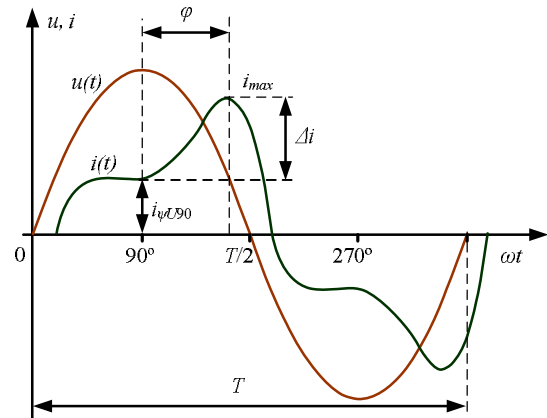


Рис. 2. Формы осциллограмм напряжения и тока намагничивания стали статора

На рис. 3 представлен общий вид аппаратной части устройства, обеспечивающей намагничивание стали статора.

На рис. 4 приведена его электрическая схема, где:  $TV$  – автотрансформатор;  $TV1$  – силовой трансформатор;  $TA1$  и  $TA2$  – измерительные трансформаторы тока;  $PW$  – ваттметр;  $PA$  – амперметр;  $PV$  – вольтметр;  $PS$  – осциллограф;  $K1, KM1$  – пускатель электромагнитный;  $KA$  – реле токовое;  $L$  – обмотка намагничивания;  $QF1$  – выключатель автоматический. На рис. 5 приведена функциональная схема регистрации и обработки сигналов напряжения и тока намагничивания стали статора, где: БПР – блок потенциальной развязки на основе PC-3; система сбора и обработки информации – комплект  $L-Card E14 - 440$ ; ПК – персональный компьютер с программным обеспечением.

Для проведения эксперимента определяют величину эталонного намагничивания при заданном числе витков  $W$  намагничивающей обмотки по методике [1]. Допустимую величину тока намагничивания при заданном числе витков вычисляют по формуле

$$I_m = \frac{H_{c1} l_{c1}}{W}, \tag{5}$$

где  $H_{c1}$  – напряженность магнитного поля в спинке статора;  $l_{c1}$  – длина средней линии магнитного потока.



Рис. 3. Аппаратная часть для инструментального исследования стали статора

Таблица 1

Средние значения магнитной индукции в спинке статора

Высота оси вращения, мм	Число пар полюсов $2p$	$B_{c1}$ , Тл
50–132	2; 4	1,50–1,65
	6	1,45–1,60
	8	1,20–1,35
160–250	2; 4	1,45–1,60
	6	1,35–1,50
	8	1,10–1,20
280–355	2; 4; 6	1,35–1,50
	8; 10	1,30–1,45
	12	1,15–1,30

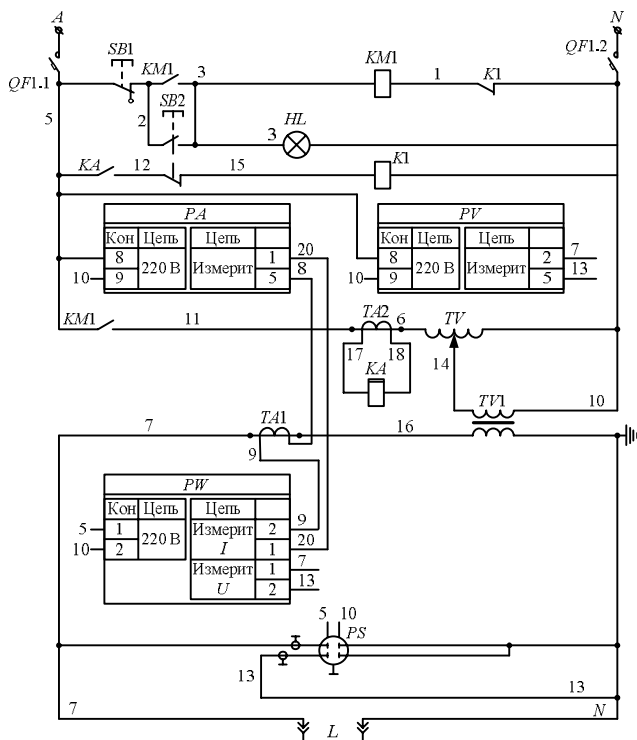


Рис. 4. Электрическая схема аппаратной части устройства для испытания стали статора

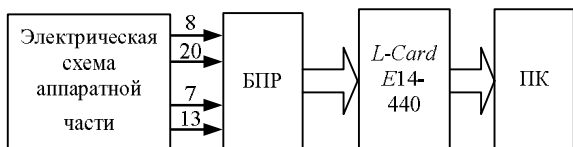


Рис. 5. Функциональная схема регистрации и обработки сигналов напряжения и тока намагничивания стали статора

Напряженность магнитного поля в спинке статора определяется с учетом кривых намагничивания  $B(H)$ , соответствующей марке стали статора (рис. 1).

Средние рекомендуемые значения магнитной индукции в спинке статора  $B_{c1}$  при проектировании асинхронных двигателей напряжением до 660 В степенью защиты IP44, IP54 представлены в табл. 1 [12].

По кривой намагничивания, с учетом высоты оси вращения, числа пар полюсов двигателя и рекомендуемой магнитной индукции  $B_{c1}$ , определяют напряженность магнитного поля в спинке статора.

Длину средней линии определяют по формуле

$$l_{c1} = \frac{\pi}{2}(D_1 + D_{н1} + 2h_{п1}), \quad (6)$$

где  $D_1$ ,  $D_{н1}$ ,  $h_{п1}$  – соответственно внутренний, наружный диаметры и высота паза стали статора, определяемые измерением соответствующих размеров.

Вычисленную величину эталонного напряжения намагничивания устанавливают с помощью автотрансформатора TV, увеличивая напряжение намагничивания  $U_m$  до эталонного  $U_{m \text{ эт}}$ . После установки тока намагничивания регистрируют аналоговые сигналы напряжения и тока намагничивания. Продолжительность регистрации не менее 3 – 5 с (150 – 250 периодов частотой 50 Гц). Аналоговые сигналы тока и напряжения намагничивания оцифровываются в L-Card E14-440 и создаются их массивы в ПК.

Из массивов сигналов напряжения и тока намагничивания формируются их полные периоды и подсчитывается их число  $N$ . Программно определяется симметричность напряжения и тока намагничивания относительно оси времени. Если кривые симметричны относительно оси абсцисс, принимается решение о том, что ряд Фурье не содержит постоянную составляющую  $U_0$  и содержит только нечетные гармоники –  $U_1, U_3, U_5$  и т.д. [6].

По каждому выделенному периоду сигналов определяются критерии 1-4.

Сигнал тока раскладывается в полный ряд Фурье, представляющий сумму синусоидальной и косинусоидальной составляющих тока. В программе предусмотрено разложение в ряд Фурье до 7 гармоники. Для этого каждый период тока разбивается на  $n$  одинаковых частей. Каждой части соответствует функция  $f_p(x)$ , где  $x = T/n = 360^\circ/n$ ;  $499 \geq n \geq 250$ .

Определяются амплитуды синусоидальной  $I'_{1m}$  и косинусоидальной  $I''_{1m}$  составляющих  $k$ -х гармоник тока:

$$I'_{km} = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} f_p(x) \sin_p(p-0,5)x; \quad (7)$$

$$I''_{km} = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} f_p(x) \cos_p(p-0,5)x. \quad (8)$$

По значениям (7)-(8) вычисляется амплитуда  $k$ -й гармоники:

$$I_{km} = \sqrt{(I'_{km})^2 + (I''_{km})^2}. \quad (9)$$

Вычисляется начальная фаза тока  $k$ -гармоники:

$$\text{tg} \varphi_k = \frac{I'_{km}}{I''_{km}}; \quad \varphi_k = \text{arctg} \left( \frac{I'_{km}}{I''_{km}} \right). \quad (10)$$

Формируется выражение мгновенного значения тока  $k$ -й гармоники:

$$i_k(t) = I_{km} \sin(k\omega t \pm \varphi_k). \quad (11)$$

Вычисляется действующее значение тока намагничивания  $I_m$ :

$$I_m = \sqrt{\sum_{k=1}^{k=7} \frac{I_{km}^2}{2}}. \quad (12)$$

Напряжение намагничивания  $U_m$  является квазисинусоидальной, поэтому по подобным процедурам и формулам, описанным для обработки сигнала тока намагничивания, осуществляется разложение в ряд Фурье сигнала напряжения намагничивания.

Вычисляются потери активной мощности в стали статора по методике расчета несинусоидальных, нелинейных электрических цепей [6]:

$$p(t) = \frac{1}{T} \int u(t)i(t)dt; \quad (13)$$

$$\Delta P_c = \frac{1}{T} \int U_1 I_1 \cos\varphi.$$

Каждый вычисленный критерий исследованных сигналов усредняется за  $N$  периодов и сравнивается с допустимым значением.

Принятие решений о качестве стали статора осуществляют по разработанным логическим уравнениям, аргументами которых являются критерии 1-5. По критерию 5 учитываются первая и третья гармоники тока намагничивания, как наиболее информативные:

$$C_x = [(\Delta P_c \wedge \varphi \wedge \Delta i \wedge \bar{I}_3) \vee \vee (\Delta P_c \wedge \varphi \wedge \Delta \bar{i} \wedge I_3) \vee (\Delta P_c \wedge \varphi \wedge \Delta i \wedge I_3)] \wedge I_1; \quad (14)$$

$$C_y = [(\Delta P_c \wedge \varphi \wedge \Delta \bar{i} \wedge \bar{I}_3) \vee \vee (\Delta P_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta i \wedge \bar{I}_3) \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \varphi \wedge \Delta i \wedge \bar{I}_3) \vee \vee (\Delta P_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta \bar{i} \wedge I_3) \vee (\Delta P_c \wedge \varphi \wedge \Delta \bar{i} \wedge I_3) \vee \vee (\Delta P_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta i \wedge I_3) \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \varphi \wedge \Delta i \wedge I_3)] \wedge I_1; \quad (15)$$

$$C_n = [(\Delta P_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta \bar{i} \wedge \bar{I}_3) \vee \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \varphi \wedge \Delta \bar{i} \wedge \bar{I}_3) \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta i \wedge \bar{I}_3) \vee \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta \bar{i} \wedge I_3) \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \varphi \wedge \Delta \bar{i} \wedge I_3) \vee \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta i \wedge I_3) \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \varphi \wedge \Delta i \wedge I_3)] \wedge I_1, \quad (16)$$

где  $C_x$  – сталь хорошая;  $C_y$  – сталь удовлетворительная;  $C_n$  – сталь плохая.

Программный комплекс реализует описанный алгоритм.

#### ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

По описанной методике с применением разработанных аппаратного и программного средств выполнены исследования стали статора асинхронных двигателей с различными повреждениями пазов (локальное оплавление паза, частичное удаление оплавленных зубцов паза и др.). Проведены множество опытов со сталью статора двигателей типа АИ225М8У3 с различными повреждениями. В **табл. 2** представлены результаты исследований стали статора с извлеченным ротором при традиционном капитальном ремонте и модернизации на энергоэффективный вариант по технологии [4]. В **табл. 2** внесены экспериментальные данные, полученные для двигателей с различными фи-

зическими состояниями стали статора двигателей; № 1 – сталь без механических и электрических повреждений; № 2 – сталь с оплавлением 20-25% эквивалентного паза; № 3 – сталь с оплавлением 45-50% эквивалентного паза; № 4 – сталь с оплавлением 80-100% эквивалентного паза.

В качестве примера на **рис. 6** и **7** представлены фрагменты осциллограмм напряжения  $u(t)$  и тока  $i(t)$ , намагничивания стали статора ремонтируемых асинхронных двигателей типа АИ225М8У3 мощностью 30 кВт, частотой вращения 735 об/мин, применяемых в качестве электропривода флотационных машин горно-обогатительного предприятия.

Ниже приведены уравнения  $i$ -х гармоник тока и напряжения намагничивания:

– для двигателя № 1 (сталь без механических и электрических повреждений):

$$i_1(t) = 113,4 \sin(\omega t - 104,9^\circ);$$

$$i_3(t) = 46,5 \sin(3\omega t - 21,5^\circ);$$

$$i_5(t) = 2,9 \sin(5\omega t + 88,4^\circ);$$

$$i_7(t) = 1,8 \sin(7\omega t - 71,3^\circ);$$

$$u_1(t) = 16,6 \sin(\omega t - 64,4^\circ);$$

$$u_3(t) = 1,9 \sin(3\omega t + 170,8^\circ);$$

$$u_5(t) = 0,5 \sin(5\omega t - 111,8^\circ);$$

$$u_7(t) = 0,1 \sin(7\omega t + 81,3^\circ);$$

– для двигателя № 4 (сталь с оплавлением 80-100% эквивалентного паза):

$$i_1(t) = 167,9 \sin(\omega t - 162,3^\circ);$$

$$i_3(t) = 45,1 \sin(3\omega t + 127,8^\circ);$$

$$i_5(t) = 6,6 \sin(5\omega t + 49,9^\circ);$$

$$i_7(t) = 0,2 \sin(7\omega t - 157,6^\circ);$$

$$u_1(t) = 16,8 \sin(\omega t - 132,5^\circ);$$

$$u_3(t) = 1,6 \sin(3\omega t - 40^\circ);$$

$$u_5(t) = 0,6 \sin(5\omega t - 102,8^\circ);$$

$$u_7(t) = 0,07 \sin(7\omega t - 60,8^\circ).$$

На **рис. 8** представлен гармонический состав тока намагничивания для двигателя № 1, а на **рис. 9** – для двигателя № 4.

Анализ **табл. 2** показывает, что принятые критерии 1-5 оценки качества стали статора соответствуют: для двигателя № 1 – допустимым значениям для хорошего качества стали статора; для двигателей 2, 3 – удовлетворительному качеству стали; для двигателей 4 – неудовлетворительному качеству стали.

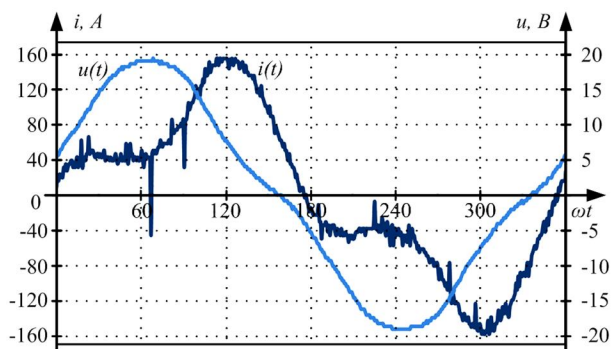


Рис. 6. Фрагмент осциллограмм напряжения и тока намагничивания стали статора асинхронного двигателя № 1 типа АИ225М8У3

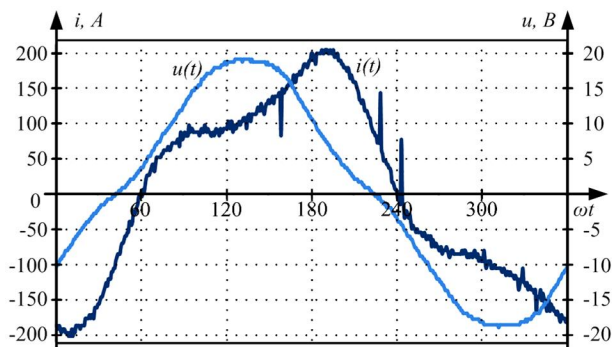


Рис. 7. Фрагмент осциллограмм напряжения и тока намагничивания стали статора асинхронного двигателя № 4 типа АИ225М8У3

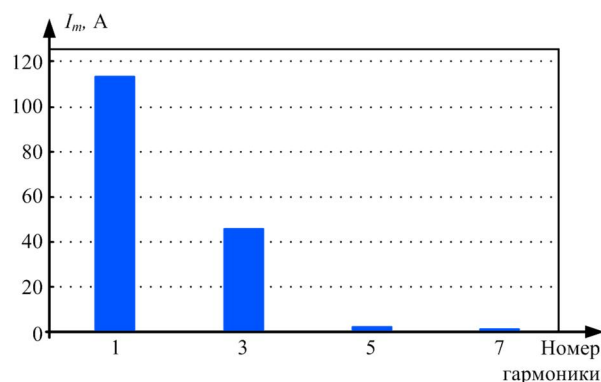


Рис. 8. Гармонический состав тока намагничивания для двигателя № 1

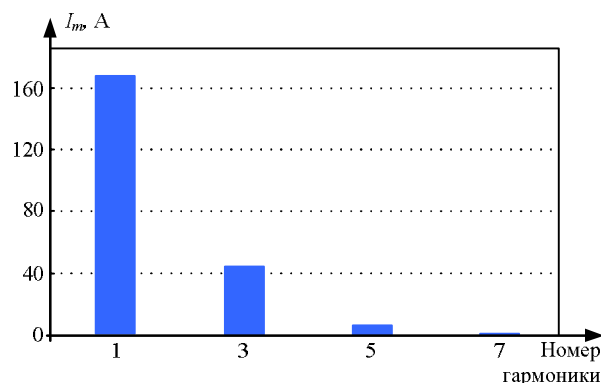


Рис. 9. Гармонический состав тока намагничивания для двигателя № 4

Таблица 2

Результаты исследований стали статора

Номер двигателя	Номер опыта	$\varphi_{нач}$ , эл.град	$\varphi$ , эл.град	$\Delta i$ , А	Напряжение, токи гармоник					$\Delta P_c$ , Вт
					$U_{мэт}$ , В	$I_{1m}$ , А	$I_{3m}$ , А	$I_{5m}$ , А	$I_{7m}$ , А	
1	1	18,4	56,7	112,8	18	113,4	46,4	2,9	1,8	717
	2	17,4	56,6	110,8	18	113,9	45,9	2,9	1,8	723
	3	18,1	56,7	110,5	18	113,1	45,8	2,7	2,0	716
Среднее значение		17,9	56,7	111,4	18	113,5	46	2,8	1,9	719
2	1	18,1	57,0	109,2	18	116,7	45,6	3,0	1,6	746
	2	18,1	56,7	108,7	18	116,0	45,5	2,3	1,5	743
	3	18,1	56,7	109,9	18	116,4	46,0	2,9	1,6	743
Среднее значение		18,1	56,8	108,9	18	116,4	45,7	2,7	1,6	744
3	1	18,4	59,7	88,8	18	141,2	42,0	7,0	1,9	958
	2	17,7	59,5	89,8	18	141,3	42,6	6,9	1,9	961
	3	18,1	59,8	88,9	18	141,3	42,1	7,4	1,9	958
Среднее значение		18,0	59,7	89,2	18	141,3	42,2	7,1	1,9	959
4	1	16,7	54,5	82,9	18	167,9	45,1	6,6	0,2	1225
	2	16,8	53,0	67,8	18	172,1	43,5	6,5	0,4	1291
	3	16,2	53,0	64,2	18	171,9	42,2	6,8	0,3	1291
Среднее значение		16,6	53,5	71,6	18	170,3	43,6	6,6	0,3	1269

По результатам исследований качества стали статора двигателей типа АИ225М8У3 программный комплекс рекомендует:

- ремонт двигателя с хорошим качеством стали статора осуществлять с сохранением номинальной мощности по заводским обмоточным данным;
- ремонт двигателей с удовлетворительным качеством стали статора осуществлять с уменьшением номинальной мощности на 3-9% и пересчетом обмоточных данных;
- ремонт двигателя с неудовлетворительным качеством стали статора не осуществлять, а утилизировать его.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика оценки качества стали статора при капитальном ремонте или модернизации асинхронных двигателей, отличающаяся тем, что для оценки качества используется критерии: сдвиг фаз  $\varphi$  напряжения и тока, равный разности фаз напряжения  $\psi_U$  и тока  $\psi_I$ , определяемых по их максимальным значениям на интервалах  $0 - T/2$ ,  $T/2 - T$ ; приращение тока намагничивания  $\Delta i$ , равное разности максимального значения тока  $i_{max}$  и тока  $i_{\psi U 90}$  при  $\psi_U = 90^\circ$ ; потери активной мощности в стали статора  $\Delta P_c$ ; сдвиг началь-

ных фаз,  $\varphi_{НАЧ}$ , напряжения и тока намагничивания; гармонический состав тока намагничивания.

2. Создан аппаратный комплекс для намагничивания стали статора с извлеченным из него ротором, содержащий: автотрансформатор, трансформатор намагничивания, измерительные приборы, осциллограф, обмотку намагничивания, блок потенциальной развязки на основе РС-3, система сбора и обработки информации на основе L-Card E14 – 440, компьютер.

3. Разработана система логических уравнений для оценки качества стали статора по предложенным критериям.

4. Разработан программный комплекс, реализующий методику оценки качества стали статора, отличающийся тем, что он позволяет принимать решение о его качестве без участия человека-оператора по логическим уравнениям, аргументами которых являются предложенные критерии.

5. Методика, аппаратный и программный комплексы позволяют оценивать качество стали статора каждого ремонтируемого двигателя, что позволяет выполнять ремонт двигателей с минимальными трудовыми и материальными затратами. Разработка рекомендуется специалистам электроремонтных предприятий.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере №555ГУЦЭС8-D3/62111.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение энергоэффективности и ресурсосбережение при капитальном ремонте, модернизации и утилизации двигателей асинхронных электроприводов / Р.Г. Мугалимов, Р.А. Закирова, А.Р. Мугалимова, К.Э. Одинцов // Вестник Магнитогорского государственного техниче-

ского университета им Г. И. Носова. 2018. Т. 16. №3. С. 145-149.

2. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высш. шк., 2012. 675 с.

3. Петушков М.Ю. Повышение ресурсоэффективности эксплуатации высоковольтных асинхронных электроприводов: дис. ... д-ра техн. наук. 05.09.03 / Петушков Михаил Юрьевич. Магнитогорск, 2015.

4. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. 250 с.

5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высш. шк., 1973. 752 с.

6. Clark S.W., Stevens D. Induction motor rotor bar damage evaluation with magnetic field analysis // IEEE Transactions on industry applications. 2016. Vol. 52. No. 2. Pp. 1469-1476. doi: 10.1109/TIA.2015.2508424.

7. Faults and Diagnosis Methods of Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review / Y. Chen, S. Liang, W. Li, H. Liang, C. Wang // Applied Sciences. 2019. No. 9(10). 2116. doi: 10.3390/app9102116.

8. Wolkiewicz M., Skowron M. Diagnostic system for induction motor stator winding faults based on axial flux // Power Electronics and Drives. 2017. No. 2(37). Pp. 137-150. doi: 10.5277/PED170204.

9. Nau S.L., Schmitz D., de Lima Pires W. Methods to evaluate the quality of stator and rotor of electric motor // IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). 2015. Pp. 64-70. doi: 10.1109/DEMPED.2015.7303670.

10. Компания Металлинвест – Справочник стали URL: <https://chel.m-invest.ru/spravochniki/> (Дата обращения 01.05.2021)

11. Корицкий Ю.В., Пасынкова В.В., Тареева Б.М. Справочник по электротехническим материалам. Ленинград: Энергия, 1976. 728 с.

12. Гурин Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электротехнических машин. М.: Энергия, 1978. 480 с.

Поступила в редакцию 30 марта 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SOFTWARE COMPLEX FOR RESEARCHING THE STATOR STEEL QUALITY DURING OVERHAULING AND MODERNIZATION OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR

Rif G. Mugalimov

D.Sc. (Engineering), Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: energosberegenie@rambler.ru.

Regina A. Zakirova

Postgraduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Regina\_174@mail.ru.

Aliya R. Mugalimova

Ph.D. (Engineering), Technical Manager, Research and Development Bureau "Energy Saving", Magnitogorsk, Russia. E-mail: energosberegenie@rambler.ru.

Anton I. Bokov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Engineer of electronic equipment, Research and Development Bureau "Energy Saving", Magnitogorsk, Russia. E-mail: bokov\_anton@mail.ru.

The study presents the results of the analysis of applied methods and computer programs for processing electrical signals that change in function of time. A methodology, hardware and software have been developed for testing the quality of the stator

steel of asynchronous machines with an extracted rotor during their overhaul or modernization at electrical repair enterprises. The test method provides for assessing the quality of the stator steel by magnetizing it with a reference voltage proportional to

the design magnetic induction in the back of the stator steel, recording oscillograms of magnetizing voltage and current and power losses in the steel. The recorded oscillograms of voltage and current are digitized. A software tool has been developed that allows analyzing of digitized signals according to the following five criteria: phase shift of voltage and current equal to the difference between the initial voltage phases and the initial phase of the current determined by their maximum values; an increment of the magnetizing current equal to the difference between the maximum value of the current and the current at a voltage phase equal to  $90^0$ ; active power losses in the stator steel; shift of the initial phases of voltage and magnetizing current; harmonic composition of voltage and magnetizing current. Logical equations have been developed, the arguments of which are the listed criteria, which allow making decisions about the quality of the stator steel, whether the steel is good, satisfactory, or bad, without human intervention. The paper contains an electrical diagram of the hardware of the device for testing stator steel; the detailed algorithm for processing digitized signals; the results of experimental studies of the stator steel of an asynchronous motor of the AI225M8Y3 type, with a power of 30 kW and the rotational speed of 735 rpm. The technique, hardware and software complex make it possible to assess the quality of the stator steel of each engine being repaired, to repair the engines with minimal labor and material costs. The development is recommended for specialists of electrical repair enterprises.

**Keywords:** asynchronous motor, stator steel, test procedure, oscillograms, hardware complex, computer program, steel quality criteria.

REFERENCES

1. Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R., Odintsov K.E. Improving energy efficiency and resource saving during overhaul, modernization and utilization of motors of asynchronous electric drives. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 145-149. (In Russian)
2. Kopylov I.P. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow, Higher school Publ., 2012. 675 p. (In Russian)
3. Petushkov M.Yu. *Povyshenie resursoeffektivnosti ekspluatatsii vysokovolnykh asinkhronnykh elektroprivodov Doktor Diss.* [Improving the resource efficiency of the operation of high-voltage asynchronous electric drives. Doctor Diss.]. Magnitogorsk, 2015.
4. Mugalimov R.G. *Asinkhronnye dvigateli s individualnoy kompensatsiey reaktivnoy moshchnosti i elektroprivody na ikh osnove* [Induction motors with individual compensation of reactive power and electric drives]. Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University Publ., 2011. 250 p.
5. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow, Higher school Publ., 1973. 752 p. (In Russian)
6. Clark S.W., Stevens D. Induction motor rotor bar damage evaluation with magnetic field analysis. *IEEE Transactions on industry applications*. 2016. Vol. 52. No. 2. Pp. 1469-1476. doi: 10.1109/TIA.2015.2508424.
7. Chen Y, Liang S, Li W, Liang H, Wang C. Faults and Diagnosis Methods of Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. No. 10. Pp. 2116. doi: 10.3390/app9102116.
8. Wolkiewicz M., Skowron M. Diagnostic system for induction motor stator winding faults based on axial flux. *Power Electronics and Drives*. 2017. No. 2(37). Pp. 137-150. doi: 10.5277/PED170204.
9. Nau S.L., Schmitz D., de Lima Pires W. Methods to evaluate the quality of stator and rotor of electric motor. *IEEE 10<sup>th</sup> International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. IEEE, 2015. Pp. 64-70. doi: 10.1109/DEMPEP.2015.7303670.
10. Metallinvest Company - Steel Directory. Available at: <https://chel.m-invest.ru/spravochniki/> (Accessed 05 January 2021).
11. Koritsky Yu.V., Pasyukova V.V., Tareeva B.M. *Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam* [Reference book on electrical materials]. Leningrad, Energy Publ., 1976. 728 p. (In Russian)
12. Gurin Ya.S., Kuznetsov B.I. *Proektirovanie seriy elektrotekhnicheskikh mashin* [Designing series of electrical machines]. Moscow: Energiya, 1978. 480 p. (In Russian)

Программный комплекс для исследования качества стали статора при капитальном ремонте и модернизации асинхронного двигателя / Р.Г. Мугалимов, Р.А. Закирова, А.Р. Мугалимова, А.И. Боков// Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 76-82. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-76-82](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-76-82)

Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R., Bokov A.I. Software Complex for Researching the Stator Steel Quality During Overhauling and Modernization of an Asynchronous Motor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 76-82. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-76-82](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-76-82)